



## TESIS DOCTORAL

# *REDUCCIÓN DE LA FUERZA DE DETENCIÓN EN MOTORES SÍNCRONOS LINEALES DE IMANES PERMANENTES EN DISPOSICIÓN HALBACH*

Autor:

Jaime Montoya Larrahondo

Directora:

Mónica Chinchilla Sánchez

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Leganés, septiembre de 2014



## TESIS DOCTORAL

### *REDUCCIÓN DE LA FUERZA DE DETENCIÓN EN MOTORES SÍNCRONOS LINEALES DE IMANES PERMANENTES EN DISPOSICIÓN HALBACH*

Autor: Jaime Montoya Larrahondo

Directora: Mónica Chinchilla Sánchez

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: Juan Carlos Burgos

Vocal: Ana M. Llor

Secretario: Jesús Fraile Ardanuy

Calificación:

Leganés, septiembre de 2014

# AGRADECIMIENTOS

*“Los momentos más difíciles comienzan cuando te decides a conquistar tus metas”.*

Primero quiero ofrecer este trabajo a Dios, dar las gracias a Él por que puso las personas, las herramientas y todo lo necesario para que este trabajo hubiera sido posible terminarlo.

Doy un agradecimiento muy especial a mi tutora la Dra. Mónica Chinchilla Sánchez que acepto dirigirme en esta tesis y me dio la oportunidad de continuar mi formación profesional en esta Universidad, que con su apoyo, su compromiso y su calidad humana me dirigió y logro hacer que este trabajo fuera posible para terminar otra etapa más en mi vida profesional.

También le doy gracias a mi buen amigo y hermano Edwin Laniado, que forjo gran parte de esta tesis y que con su apoyo incondicional me ayudo a sacar adelante este proyecto.

Gracias a mi esposa Diana que siempre ha estado en todos los momentos difíciles y alegres de esta etapa, a mis hijos que de alguna manera han padecido el sacrificio de no compartir conmigo algunos momentos de alegría y ocio, al igual que mis pequeños Luis Felipe y Laura Andrea que a pesar de la distancia siempre he tenido el estímulo y su respeto para seguir adelante.

Gracias a mi buen amigo Gabriel González que fue de vital importancia su investigación para dar pie y empuje al desarrollo de esta tesis.

Gracias también a mi buen amigo Henry Laniado que sus enseñanzas en temas de estadística y matemáticas fueron parte básica y fundamental para el desarrollo y entendimiento de esta investigación.

También gracias a mi madre, mi hermano y todos mis familiares que siempre estuvieron pendientes de mis estudios y de alguna manera me alentaron y animaron a seguir adelante en este proyecto.

Son muchas las personas y amigos que quiero agradecer por su apoyo, su voz de aliento e interés, amigos como Myriam, Nacho, Mónica Victoria, Jorge Ardila, Ángel, Ricardo y a todos los profesores del departamento de Ingeniería Eléctrica que también hicieron su aporte para lograr esta meta.

A todos vosotros Gracias y que Dios los Bendiga.

# RESUMEN

El avance en materia tecnológica de los sistemas y medios de transporte tiene una vital importancia en el desarrollo de una sociedad. Existe un interés constante en promover avances tecnológicos de aplicación al transporte público que proporcionen a los usuarios un medio de transporte seguro, eficiente, limpio, no ruidoso, económico y fiable.

En la actualidad el desarrollo y adaptación de medios de transporte que empleen motores eléctricos es una de las principales líneas de investigación al respecto. Las características que definen este motor eléctrico ofrecen una serie de mejoras y ventajas frente a los propulsores montados en los autobuses públicos actuales.

El mayor aprovechamiento de la energía, la capacidad de alcanzar velocidades superiores, un aumento en el confort de marcha, la reducción de la fricción y un compromiso con el medio ambiente son sus principales argumentos.

El sistema de propulsión con motor eléctrico lineal solo precisa del vínculo electromagnético entre los dispositivos móviles y fijos, eliminándose así la necesidad de un sistema de transmisión para convertir el movimiento rotativo en lineal, con las ventajas que esto conlleva.

Las ventajas principales que presentan los motores lineales respecto a los rotativos se basan en que la transmisión de la fuerza se realiza ahora directamente por el campo magnético. Todo ello proporciona una serie de ventajas en aplicaciones de transporte sobre los accionamientos tradicionales basados en transmisiones mecánicas:

- Mayores valores de velocidad, pudiendo llegar hasta 300 m/min.
- Mayores valores de aceleración, lo que en muchas aplicaciones es más importantes que el valor de la velocidad máxima.
- Mayor ancho de banda del sistema de accionamiento, mejorando la rapidez y la calidad de respuesta del eje.

- El sistema es más preciso cuando se desplaza a altas velocidades, por lo que la calidad de la interpolación así como la velocidad y precisión en aplicaciones de contorno se incrementan notablemente
- Reducción de los niveles de vibración y del ruido sin comprometer el grado de prestaciones
- Mayor fiabilidad porque hay menos desgaste (la aceleración y el frenado no dependen de la fricción).
- No dependen de la fricción para salvar pendientes, es decir, pueden aplicarse para cualquier pendiente, incluida la posición vertical.
- En aplicaciones de transporte, eliminan la necesidad de tener una alimentación para la propulsión y control del vehículo, por lo que el vehículo puede ser pasivo.

El incremento de la disponibilidad de materiales magnéticos que han permitido construir imanes permanentes con la suficiente fuerza coercitiva para no ser desmagnetizados por efecto de la reacción de inducido durante el arranque y aceleración y la utilización generalizada de convertidores estáticos, han proporcionado la oportunidad de desarrollar Motores Síncronos Lineales de Imanes Permanentes (MSLIP) aplicados al transporte; son motores de elevadas prestaciones en velocidad y rendimiento y con un reducido tamaño en comparación con un motores de inducción de igual potencia.

Los MSLIPs con núcleo ranurado presentan en el entrehierro unas variaciones de energía debidas a la tendencia que tienen los imanes de alinearse en la posición de mínima reluctancia con respecto a los dientes de la armadura, la denominada fuerza de diente (*cogging force* en ingles). Además, la inducción magnética de la excitación en el entrehierro es no sinusoidal, por la geometría del deslizador de imanes. La combinación de los efectos mencionados produce una fuerza de retención o de retención (en inglés se le conoce como “*detent force*”), que se manifiesta en pequeños saltos u ondulaciones y afectan el empuje del MSLIP originando variaciones momentáneas de la velocidad en el motor que especialmente, dificultan el control del mismo, pudiendo producir inestabilidad mecánica y generar ruido.

En la literatura existente se encuentran técnicas para reducir la fuerza de retención aplicadas a las diferentes topologías de MSLIPs; pero en general, son pocas o casi inexistentes las aplicaciones de las técnicas de mejoras mediante el proceso de inclinación de los imanes en configuración Halbach.

En general, en la tesis se presenta el diseño de un motor eléctrico capaz de propulsar un vehículo a la velocidad adecuada sin necesidad de sistemas de acumulación de energía. Se propone inicialmente un MSLIP en disposición Halbach (MSLIP-H) cuyos parámetros de diseño se deducen a partir de un motor síncrono rotativo comercial. Se realizan varias mejoras sobre este prototipo inicial, como son:

- El uso de una adecuada relación entre la longitud del imán y el paso de ranura, relación que consigue reducir la fuerza de retención en los MSLIP-H.
- Se comprueba el efecto de la inclinación de los imanes MSLIP-H sobre las fuerzas que intervienen en el movimiento del motor, obteniendo los valores de la fuerza de empuje, y de la fuerza normal del motor.

También se realiza un análisis de vibraciones de dos modelos de MSLIPs de polos opuestos con diferente ranurado estatístico.

Sobre el diseño propuesto se modifica la geometría de los imanes del deslizador, haciendo nuevas propuestas que hemos denominado MSLIP-H TIPO 7, L & Z); con ellas, se reduce considerablemente el “stress” de los propios imanes y se concentra la mayor parte de flujo magnético en el entrehierro produciendo una reducción del rizado de la fuerza propulsora del motor, disminuyendo la vibración y el nivel de ruido.

El análisis electromagnético se ha realizado mediante el cálculo numérico; se ha simulado por el método de los elementos finitos (FEM) con software Flux™ V10.3, licencia comercial; para validar los resultados de la simulación se han comparado con otros resultados publicados por diferentes autores que trabajan en el diseño de motores síncronos lineales de imanes y que han sido contrastadas con resultados experimentales.

# ABSTRACT

The advancement in technology systems and means of transport has a vital importance in the development of a society. There is a constant interest in promoting technological advances applicable to public transport to provide users a means of safe, efficient, clean, not noisy, economical and reliable transportation.

Currently the development and adaptation of transport that use electric motors is one research about of the main lines. The defining characteristics of the electric motor offers a number of improvements and advantages over propellers mounted on existing public buses.

The largest use of energy, the ability to reach higher speeds, increased ride comfort, reduced friction and a commitment to the environment are the main arguments.

The propulsion system with linear electric motor only requires the electromagnetic link between the mobile and fixed devices, thus eliminating the need for a transmission system to convert the rotary motion into linear, with the advantages this entails as reducing efforts adherence by the driving wheels or reducing maintenance requirements.

The main applications of MSLIP, derived from its particular characteristics have been widely described in the literature, fixing his attention on all drives that require a combination of bound motors and to be maintained at the same rate strictly . Its application has been especially advantageous in the textile industry and in glass.

The increased availability of magnetic materials to build permanent magnets have allowed enough coercive force to not be demagnetized due to the armature reaction during starting and acceleration and the widespread use of static converters, have provided the opportunity to develop MSLIP applied to transport; are engine speed, high performance and efficiency and reduced size when compared to an induction motor of the same power.



The main advantages offered by the linear motor with respect to the rotating based on the transmission of force are now carried out directly by the magnetic field. This provides a number of advantages in transport applications over traditional drives based on mechanical drives:

- High speeds, can reach up to 300 m / min.
- Increased acceleration, which in many applications is more important than the value of the maximum speed.
- Higher bandwidth of the drive system, improving the speed and quality of response axis.
- The system is more accurate when moving at high speeds, so that the quality of the interpolation as well as speed and accuracy in contoured applications are notably increased
- Reduced levels of vibration and noise without compromising the level of benefits
- Higher reliability because there is less wear (acceleration and braking do not depend on friction).
- Do not rely on friction to save remaining, i.e., they can be applied for any slope, including vertical.
- In transportation applications, eliminating the need for a power for propulsion and control of the vehicle, so the vehicle can be passive.

In slotted PMLSMs exists an interaction between the secondary permanent magnets and the teeth of the primary core. Generally, undesired effect contributes to increase the vibration and noise. The potential causes of the thrust ripple in PMLSMs are resulted from the slotting, the finite length of the armature and current harmonics.

To reduce thrust ripple in PMLSM several methods have been reported by many researchers. These methods are achieved either by an adequate control of the driver or by special motor design. Most widely used methods at the design stage include:

- Changing the ratio of magnet width to pole pitch.
- Skewing and optimally disposing the magnets.

Or rearranging the permanent magnet. Sometimes these methods can be a burden during the manufacturing stage increasing manufacturing cost.

However, investigation for the thrust ripple reduction of linear Halbach topology with skewed magnets has not been enough reported. An optimized slider structure incorporating permanent magnets in Halbach array is proposed; we compare it with a standard Halbach array as well as with other optimized design motors using inclined magnets in the slider

New topologies of the slider are presented (which we called MSLIP-H TYP 7 L & Z) adapted to the Halbach magnet configuration; This greatly reduces the "stress" of the magnets themselves and concentrates the majority of magnetic flux in the air gap leading to a reduction of force ripple caused by the driving force of the motor, reducing vibration and noise.

The electromagnetic analyzes were performed using the numerical calculation; has been simulated by the finite element method (FEM) with Flux <sup>TM</sup> V10.3 software License; the simulation results are compared with other results published by different authors working on the design of linear permanent magnet synchronous motors that have been tested with experimental results.

## **ÍNDICE GENERAL**

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN.....	III
ABSTRAC .....	VI
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVIII
ABREVIATURAS.....	XX

CAPITULO 1.....	25
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	25
1.1 MOTORES SÍNCRONOS LINEALES.....	27
1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS.....	28
1.2.1 RESUMEN DE LOS OBJETIVOS DE LA TESIS: .....	28
1.3 INTRODUCCIÓN A LAS MAQUINAS ELÉCTRICAS LINEALES.....	29
1.3.1 MOTORES LINEALES. CLASIFICACIÓN.....	33
1.4 APLICACIONES EN SISTEMAS DE TRANSPORTE.....	36
1.4.1 TRANSPORTE POR LEVITACIÓN MAGNÉTICA.....	36
1.4.2 TRENES DE ALTA VELOCIDAD ART (ADVANCED RAPID TRANSIT).....	37
1.4.3 METRO.....	39
1.4.4 MONORRAÍL.....	40
1.4.5 SISTEMAS DE PROPULSIÓN.....	40
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	41
REFERENCIAS.....	44

CAPITULO 2.....	47
2. ESTADO DEL ARTE.....	47
2.1 MOTORES SÍNCRONOS LINEALES (MSL).....	47
2.2 MOTOR SÍNCRONO LINEAL DE IMANES PERMANENTES (MSLIP).....	54
2.2.1 CLASIFICACIÓN. TOPOLOGÍAS DE LOS MSLIP.....	54
A. ESTATOR CORTO – ESTATOR LARGO.....	55
B. MONOLÁTEROS – BILÁTEROS.....	56
C. PLANOS – TUBULARES.....	57

<i>D. FLUJO LONGITUDINAL – FLUJO TRANSVERSAL.</i>	58
<i>E. CON NÚCLEO FERROMAGNÉTICO – SIN NÚCLEO FERROMAGNÉTICO.</i>	58
<i>2.2.2 DISPOSICIÓN HALBACH.</i>	60
<i>2.3 FUERZAS PRESENTES EN LOS MSLIP.</i>	62
<i>2.3.1.1 FUERZAS NORMALES AL DESPLAZAMIENTO.</i>	67
<i>2.3.1.2 FUERZAS DE EMPUJE.</i>	73
<i>2.3.1.2.1 INCREMENTO DE LA FUERZA DE EMPUJE.</i>	74
<i>2.3.1.2.2 DISMINUCIÓN DEL RIZADO DE LA FUERZA DE EMPUJE.</i>	75
<i>2.3.1.3 CLASIFICACIÓN DE LAS FUERZAS QUE PRODUCEN EL RIZADO EN UNA FUERZA DE EMPUJE.</i>	76
<i>2.4 DISEÑO DEL MSLIP.</i>	77
<i>2.5 CONTROL DE MSLIP.</i>	79
<i>REFERENCIAS.</i>	81
 <i>CAPITULO 3.</i>	87
<i>3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y TEORÍA DE ELECTROMAGNETISMO APLICADA AL MOTOR LINEAL SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES.</i>	87
<i>3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.</i>	87
<i>3.2 ECUACIONES FUNDAMENTALES.</i>	90
<i>3.2.1 POTENCIAL VECTOR DE CAMPO MAGNÉTICO.</i>	90
<i>3.2.2 POTENCIAL ESCALAR DE CAMPO MAGNÉTICO.</i>	92
<i>3.2.3 MAXWELL STRESS TENSOR (MST).</i>	94
<i>3.3 APLICACIÓN DEL MEF EN ELECTROMAGNETISMO.</i>	96
<i>3.3.1 LAS ECUACIONES DE MAXWELL EN LA FORMA DIFERENCIAL.</i>	96
<i>3.3.2 LAS ECUACIONES DE MAXWELL EN LA FORMA INTEGRAL.</i>	98
<i>3.3.3 ECUACIONES FUNDAMENTALES DEL ELECTROMAGNETISMO EN MEDIOS MATERIALES.</i>	99
<i>3.3.4 RELACIÓN MAGNETOSTÁTICA DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.</i>	100
<i>3.4 CAMPO MAGNÉTICO DEL DEVANADO DE ARMADURA.</i>	104
<i>3.5 VOLTAJE INDUCIDO.</i>	108
<i>3.6 POTENCIA ELECTROMAGNÉTICA Y EMPUJE DEL MSLIP.</i>	111
<i>3.6.1. CÁLCULO DE FUERZAS EN IMANES PERMANENTES EN DISPOSICIÓN HALBACH.</i>	114

REFERENCIAS.....	121
 CAPITULO 4.....	 123
4DISEÑO DEL MSLIP CON IMANES PERMANENTE EN DISPOSICION HALBACH (MSLIP-H).....	123
4.1 DISEÑO DEL MSLIP-H PARA APLICACIONES DE TRANSPORTE.....	123
4.1.1.CÁLCULO DE LA FUERZA DE PROPULSIÓN PARTIENDO DE UN ESTUDIO DE FUERZAS DE EMPUJE MECÁNICO.....	124
4.2 DISEÑO DEL MSLIP A PARTIR DE UN MOTOR ROTATIVO.....	129
4.3 CONVERSIÓN A MSLIP-H.....	133
4.3.1 DESCRIPCIÓN DEL ESTATOR Y ENTREHIERRO.....	133
4.3.2 DESCRIPCIÓN DEL DESLIZADOR.....	135
4.3.3 SELECCIÓN DE LOS IMANES PERMANENTES.....	135
4.3.4 ESTATOR.....	137
4.3.5 MALLADO DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO SIMULADO.....	140
4.4 SIMULACIÓN DEL MSLIP-H.....	142
4.4.1RESULTADOS DEL MODELADO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO DEL MSLIP-H CON RANURA ABIERTA.....	143
4.4.2 ANÁLISIS ESTÁTICO DEL MSLIP-H.....	144
4.4.3ANÁLISIS TRANSITORIO: FUERZA DE EMPUJE Y FUERZA DE RIZADO.....	147
4.5 MODELO NUMÉRICO VALIDADO.....	150
REFERENCIAS.....	155
 CAPITULO 5.....	 157
5.MEJORAS DE DISEÑO PROPUESTAS PARA EL MSLIP EN CONFIGURACIÓN HALBACH.....	157
5.1ANÁLISIS DE LA FUERZA DE EMPUJE, RIZADO Y VIBRACIÓN EN DOS MODELOS DE MSLIP CON DIFERENTE RANURADO ESTATÓRICO.....	158
5.1.1 ANÁLISIS DEL MODELO NUMÉRICO.....	161
5.1.2ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS PULSOS DE FUERZA MEDIANTE LA FFT.....	165
5.1.3 CONCLUSIONES.....	169

5.1.4 APLICACIÓN DEL TIPO DE RANURA SELECCIONADO SOBRE EL MSLIP-H DE PARTIDA.....	169
5.2 TÉCNICA DE REDUCCIÓN DE LA FUERZA DE RETENCIÓN A PARTIR DE UNA ADECUADA RELACIÓN ENTRE LA LONGITUD DEL IMÁN Y EL PASO DE RANURA. .	171
5.2.1 FUERZA DE DIENTE.....	172
5.2.2 FUERZAS EN RÉGIMEN DINÁMICO. FUERZAS DE PROPULSIÓN Y FUERZAS NORMAL.....	173
5.3 EFECTO DE LA INCLINACIÓN DE LOS IMANES SOBRE EL MSLIP-H DE PARTIDA. ....	177
5.3.2 CONCLUSIONES.....	191
REFERENCIAS.....	193
 CAPITULO 6.....	 197
6. PROPUESTA DE NUEVAS TOPOLOGÍAS DEL MSLIP-H.....	197
6.1 NUEVOS DISEÑOS DEL DESLIZADOR DE IMANES PERMANENTES.....	197
6.1.1 DISEÑO GEOMÉTRICO TYP-7.....	199
6.1.2 DISEÑO GEOMÉTRICO TYP-L.....	204
6.1.3 DISEÑO GEOMÉTRICO TYP-Z.....	211
REFERENCIAS.....	220
 CAPITULO 7.....	 225
7. CONCLUSIONES, APORTES Y PUBLICACIONES. ....	225
7.1 CONCLUSIONES. ....	225
7.2 APORTACIONES.....	228
7.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DEL MSLIP-H.....	229
 ANEXO: MODELADO DE LAS ESTRUCTURAS PARA UN MOTOR LINEAL.....	 233
A.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA SOPORTE DEL DESLIZADOR. ....	233
A.1.1 MODELADO DE LA ESTRUCTURA DEL DESLIZADOR.....	234
A.1.2 ANÁLISIS DE MODOS DE VIBRACIÓN. ....	236
A.1.3 ANÁLISIS DE TENSIÓN A LA ESTRUCTURA BAJO CARGA DINÁMICA.....	237
A.1.4 ANÁLISIS DE EMPUJE.....	238

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1: Clasificación del Motor Lineal. [Elaboración propia].</i>	35
<i>Figura 1.2: Sistema de propulsión de un tren Maglev [14].</i>	36
<i>Figura 1.3: Ascenso de pendiente de un tren Maglev respecto a uno convencional [15].</i>	37
<i>Figura 1.4: Aplicación de transporte con MSLIP con fuerza vertical de atracción [16].</i>	38
<i>Figura 1.5: ART en Vancouver (Canadá) [17].</i>	39
<i>Figura 1.6: Metro de Guangzhou (China) [18].</i>	39
<i>Figura 1.7: Vía del monorraíl de Moscú [19].</i>	40
<i>Figura 2.1: Topología heteropolar de un MSL [2].</i>	47
<i>Figura 2.2: Topología homopolar de un MSL [2].</i>	48
<i>Figura 2.3: MSL Configuración homopolar doble excitación de polos salientes [4].</i>	49
<i>Figura 2.4: MSL en configuración Heteropolar con Campo y Devanado del Inducido en el mismo dispositivo y Estructura ferromagnética pasiva [4].</i>	50
<i>Figura 2.5: MSL con excitación de campo doble excitado con electroimanes [4].</i>	51
<i>Figura 2.6: MSL con excitación individual de polos salientes (Motor lineal de reluctancia) [4].</i>	52
<i>Figura 2.7: Estructura de Doble-ranura de un Motor Lineal Vernier [4].</i>	53
<i>Figura 2.8: Topología de MSL_Tubular de Imanes Permanentes [2].</i>	53
<i>Figura 2.9: Clasificación de MSL de acuerdo al sistema de excitación [4].</i>	54
<i>Figura 2.10: Topología del MSLIP, (a) Estator corto; (b) Estator Largo [6].</i>	56
<i>Figura 2.11: MSLIP Topologías Monolátero (a); y Bilátero (b) [1].</i>	57
<i>Figura 2.12: MSLIP Plano (a); Tubular (b) [7].</i>	58
<i>Figura 2.13: MSLIP de flujo longitudinal (a) y flujo transversal (b) [8, 9].</i>	58
<i>Figura 2.14: Núcleo de MSLIP con hierro (a) y con Resina Epoxy (b) [10].</i>	59
<i>Figura 2.15: MSL con Imanes Permanentes en configuración HALBACH [Elaboración propia].</i>	60
<i>Figura 2.16: Distribución de campo magnético del MSLIP configuración Halbach [Elaboración propia].</i>	61
<i>Figura 2.17: Distribución de cargas formadas por dos fases del inducido [16].</i>	61
<i>Figura 2.18: Motor de reluctancia lineal con secundario segmentado [21].</i>	64

<i>Figura 2.19: Representación de las fuerzas de un motor lineal aplicado a sistema de transporte [20].</i>	66
<i>Figura 2.20: Sección longitudinal del MSLIP [28].</i>	68
<i>Figura 2.21: Onda fundamental de campo producido por el estator y FMM producida por los IP [28].</i>	68
<i>Figura 2.22: Fuerzas de empuje y elevación en función del ángulo de carga mecánica.</i>	70
<i>Figura 2.23: Diagrama de bloques del control FOC del MSLIPs.</i>	80
<i>Figura 3.1: Modelo de mallado en 2D del motor lineal.</i>	88
<i>Figura 3.2: Diagrama fasorial del MSLIP. a) Sub-excitado, b) Sobre-excitado[10].</i>	110
<i>Figura 3.3: Empujes Síncrono (1), de Reluctancia (2) y Resultante (3) del MSLIP de polos salientes [10].</i>	113
<i>Figura 3.4: Curvas de Empuje Síncrono, de Reluctancia y Resultante del MSLIP propuesto.</i>	114
<i>Figura 3.5: Disposición de una placa magnética para el cálculo de potencial y campo magnético [16].</i>	115
<i>Figura 3.6: Inducción Magnética creada por un imán permanente [16].</i>	117
<i>Figura 3.7: Campo magnético producido por una densidad de corriente en la superficie del imán.</i>	119
<i>Figura 4.1: Prototipo rotativo 45kW de Imanes Permanentes [8, 9].</i>	130
<i>Figura 4.2: Extracción de la porción de modelo a estudiar.</i>	132
<i>Figura 4.3: Representación de los planos de estudio del flujo magnético en el modelo.</i>	132
<i>Figura 4.4: Modelo del MSLIP transformado de un motor rotativo de 45 kW.</i>	135
<i>Figura 4.5: Curva característica de Inducción Magnética de los Imanes.</i>	136
<i>Figura 4.6: Líneas de flujo magnético de Imanes tipo Halbach.</i>	137
<i>Figura 4.7: Curva característica de inducción magnética del material de la Armadura EL_STEEL.</i>	138
<i>Figura 4.8: Devanado trifásico, seis polos, bobina de paso diametral distribuido en 36 ranuras.</i>	138
<i>Figura 4.9: Ejemplo de mallado del modelo simulado.</i>	141
<i>Figura 4.10: Sección longitudinal del MSLIP propuesto en configuración Halbach.</i>	142



<i>Figura 4.11: Líneas de flujo concentradas en el Entrehierro del MSLIP en configuración Halbach.</i>	143
<i>Figura 4.12: Fuerza de diente modelo de MS de 45kW convertido a lineal.</i>	145
<i>Figura 4.13: Forma de onda de la fuerza de diente como una función de la posición angular del modelo rotativo calculado con diferentes mallados.</i>	145
<i>Figura 4.14: Forma de onda de la fuerza de diente obtenida desde FLUX3D®.</i>	146
<i>Figura 4.15: Componente normal en dirección del eje x de la Densidad de Flujo en el entrehierro.</i>	146
<i>Figura 4.16: Fuerza de Empuje del deslizador para el modelo inicial de MSLIP-H.</i>	148
<i>Figura 4.17: Fuerza Normal o de atracción del modelo transformado en lineal.</i>	149
<i>Figura 4.18: Modelo construido para validar prototipo inicial del autor Seok et al.</i>	152
<i>Figura 4.19: Densidad de Flujo Magnético en dirección-Tangencial al movimiento. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado de MSLIP en configuración Halbach.</i>	152
<i>Figura 4.20: Densidad de Flujo Magnético componente-Normal al movimiento. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado de MSLIP-H.</i>	153
<i>Figura 4.21: Densidad de Flujo componente tangencial producida por devanado trifásico. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado del MSLIP-H.</i>	153
<i>Figura 4.22: Densidad de Flujo componente normal producida por devanado trifásico. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado del MSLIP-H.</i>	154
<i>Figura 4.23: Fuerza de Empuje. A) Modelo Seok. B) Prototipo validado de MSLIP-H</i>	154
 <i>Figura 5.1: Comparación de la fuerza de diente de acuerdo para dos tipos de ranuras del estator [5].</i>	159
<i>Figura 5.2: Estructura de los dos modelos: MSLIP-1 y MSLIP-2.</i>	160
<i>Figura 5.3: Empuje del MSLIP-1 y MSLIP-2 con diferente ranurado.</i>	160
<i>Figura 5.4: Inclínación de los imanes del MSLIP-2. A) Vista frontal. B) Vista superior.</i>	162
<i>Figura 5.5: Datos de la fuerza Magnética (N) de los modelos A: MSLIP-1 y B: MSLIP-2 para distintos valores de la inclinación de los imanes.</i>	164
<i>Figura 5.6: Análisis de los modelos A) MSLIP-1 y B) MSLIP-2 con <math>\Delta D = 0\tau_s</math>.</i>	166
<i>Figura 5.7: Modelo MSLIP-1 con <math>\Delta D = 0\tau_s</math> y <math>\Delta D = \tau_s/2</math></i>	167
<i>Figura 5.8: MSLIP-1 model con <math>\Delta D = 1\tau_s</math> y <math>\Delta D = 3/2\tau_s</math>.</i>	167
<i>Figura 5.9: Modelo MSLIP-1 con <math>\Delta D = 2\tau_s</math>.</i>	168

<i>Figura 5.10: Modelo MSLIP-2 con <math>\Delta D = 32\tau_s</math>.</i>	168
<i>Figura 5.11: Comparación de la Fuerza de diente de acuerdo a la forma del ranurado para los modelos simulados LIN45_EST.</i>	170
<i>Figura 5.12: Fuerza de Diente modelos LIN45_EST y TYPN5AG.</i>	173
<i>Figura 5.13: Fuerza Tangencial del modelo LIN45_TRA.</i>	174
<i>Figura 5.14: Fuerza Normal Modelo LIN45TRA.</i>	175
<i>Figura 5.15: Fuerza tangencial del modelo TYPN5AG.</i>	175
<i>Figura 5.16: Fuerza Normal modelo TYPN5AG.</i>	176
<i>Figura 5.17: Pulsos en Frecuencia del prototipo LIN45_TRA.</i>	176
<i>Figura 5.18: Pulsos de Frecuencia del prototipo TYPN5AG.</i>	177
<i>Figura 5.19: Inclinação de los imanes del MSLIP-H. A) Vista frontal. B) Vista superior.</i>	178
<i>Figura 5.20: MSLIP con imanes en configuración Halbach inclinado <math>\Delta D = 1\tau_s</math>.</i>	179
<i>Figura 5.21: MSLIP en configuración Halbach con Imanes inclinados, vista de planta.</i>	179
<i>Figura 5.22: Fuerza de empuje del MSLIP-H con Imanes inclinados (<math>0-3/2 \tau_s</math>) para distintos entrehierros.</i>	182
<i>Figura 5.23: Inclinação de los imanes óptima en el MSLIP-H para distintos entrehierros</i>	183
<i>Figura 5.24: Densidad de flujo para el MSLIP-H medido en el entrehierro de longitud 15 mm.</i>	183
<i>Figura 5.25. Fuerzas de Empuje del MSLIP-H con entrehierro de 15mm.</i>	186
<i>Figura 5.26. Fuerzas de Empuje del MSLIP-H con entrehierro de 20 mm.</i>	187
<i>Figura 5.27. Fuerzas de Empuje del MSLIP-H con entrehierro de 30 mm.</i>	187
<i>Figura 5.28: Fuerza Normal modelo TYPN con 15mm de Entrehierro y <math>3/4T_s</math>. A) Fuerza normal con referencia al eje X. B) Fuerza Normal vista con sus límites máximos.</i>	188
<i>Figura 5.29: Fuerza Normal modelo TYPN con 20mm de Entrehierro y <math>1/2T_s</math>. A) Fuerza normal con referencia al eje X. B) Fuerza Normal vista con sus límites máximos.</i>	189
<i>Figura 5.30: Fuerza Normal modelo TYPN con 30mm de Entrehierro y <math>0T_s</math>. A) Fuerza normal con referencia al eje X. B) Fuerza Normal vista con sus límites máximos.</i>	190
<i>Figura 5.31: Fuerza Normal de los modelos que mejor resultado presentaron según el ratio <math>F_e/Rizado</math>.</i>	191

<i>Figura 6.1: Geometría Imanes TYP-C, (A) Modelo 3D. (B) Vista sobre plano YZ. ....</i>	<i>199</i>
<i>Figura 6.2. Topología del MSLIP-H TYP-7. (A) Prototipo TYP-7 en 3D, (B) Geometría de deslizador vista sobre el plano YZ.....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 6.3: Densidad de Flujo del Prototipo MSLIP-H TYP-7.....</i>	<i>202</i>
<i>Figura 6.4: Densidad de Flujo Magnético Componentes X, Y, Z del modelo TYP-7 a 15mm de entrehierro. ....</i>	<i>203</i>
<i>Figura 6.5: Componente X de la Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro de 15mm modelo TYP-7.....</i>	<i>203</i>
<i>Figura 6.6: Componente Y de la Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro de 15mm modelo TYP-7.....</i>	<i>204</i>
<i>Figura 6.7: Topología del MSLIP-H TYP-L. Prototipo de topología L en 3D.....</i>	<i>205</i>
<i>Figura 6.8: Topología del MSLIP-H TYP-L. (B) Geometría de deslizador vista sobre el plano YZ.....</i>	<i>205</i>
<i>Figura 6.9: Fuerzas de Empuje de los prototipos TYP-7 y TYP-L a 15mm de entrehierro.....</i>	<i>207</i>
<i>Figura 6.10: Fuerzas Normales de los modelos TYP-7 &amp; TYP-L a 15mm de entrehierro. ....</i>	<i>207</i>
<i>Figura 6.11: Densidad de Flujo del Prototipo MSLIP-H TYP-L.....</i>	<i>208</i>
<i>Figura 6.12: Densidad de Flujo Magnético Componentes X, Y, Z del modelo TYP-L a 15mm de entrehierro y <math>\tau_s/2</math>.....</i>	<i>209</i>
<i>Figura 6.13: Componente X de Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro 15mm modelo TYP-L.....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 6.14: Componente Y de Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro de 15mm modelo TYP-L.....</i>	<i>210</i>
<i>Figura 6.15. Topología MSLIP-H TYP-Z. (A) Prototipo TYP-Z en 3D, (B) Geometría en plano YZ.....</i>	<i>211</i>
<i>Figura 6.16: Fuerza de diente modelos TYPN5AG y TYP-Z5AG.....</i>	<i>213</i>
<i>Figura 6.17: Fuerza de empuje del MSLIP-H con Imanes inclinados (<math>1/2-3/2 \tau_s</math>) para distintos valores del entrehierro.....</i>	<i>214</i>
<i>Figura 6.18: Fuerzas de Empuje modelo TYP-Z para diferentes ángulos de inclinación, 15mm de Entrehierro con densidad de corriente en <math>3 \text{ A/mm}^2</math>.....</i>	<i>217</i>
<i>Figura 6.19: Fuerzas de Empuje modelo TYP-Z para diferentes ángulos de inclinación, 20mm de Entrehierro con densidad de corriente en <math>3 \text{ A/mm}^2</math>.....</i>	<i>217</i>

<i>Figura 6.20: Fuerzas de Empuje modelo TYP-Z para diferentes ángulos de inclinación, 30mm de Entrehierro con densidad de corriente en 3 A/mm<sup>2</sup>.....</i>	<i>218</i>
<i>Figura 6.21: Campo Magnético modelo TYP-Z a 15mm de entrehierro, 3 A/mm<sup>2</sup>.....</i>	<i>219</i>
<i>Figura 6.22: Densidad de Flujo Magnético TYP-Z 15mm de entrehierro, 3 A/mm<sup>2</sup> ..</i>	<i>219</i>
<i>Figura 6.23: Campo Magnético del TYP-Z a 15mm entrehierro y 6 A/mm<sup>2</sup>.....</i>	<i>220</i>
<i>Figura 6.24: Densidad de Flujo Magnético TYPZ 15mm de Entrehierro, 6 A/mm<sup>2</sup>...</i>	<i>220</i>
<i>Figura 6.25: Densidad de Flujo Magnético en prototipo TYP-Z a 15 mm de entrehierro y con densidad de corriente de 3 A/mm<sup>2</sup>.....</i>	<i>221</i>
<i>Figura 6.26: Fuerzas Empuje y Normal del prototipo TYP-Z a 20 mm de entrehierro y densidad 3 A/mm<sup>2</sup> .....</i>	<i>221</i>
<i>Figura A.1: Modelado de varias piezas (cuna, imanes, jaula). .....</i>	<i>234</i>
<i>Figura A.2: Ensamblaje división de apoyo del deslizador.....</i>	<i>234</i>
<i>Figura A.3: Modelo del deslizador completo no optimizado. ....</i>	<i>235</i>
<i>Figura A.4: Malla del modelo optimizado para el cálculo en MEF. ....</i>	<i>235</i>
<i>Figura A.5: Primer modo de vibración con movimiento en Y.....</i>	<i>236</i>
<i>Figura A.6: Resultados de tensiones bajo carga dinámica.....</i>	<i>237</i>
<i>Figura A.7: Muestra de una parte de la simulación. ....</i>	<i>237</i>
<i>Figura A.8: Modelo de deslizador optimizado para calcular la fuerza de empuje.....</i>	<i>238</i>
<i>Figura A.9: Ubicación de los cuatro MSLIPs en la carcasa del autobús.....</i>	<i>238</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1: Comparación de parámetros de un MSLIP con Motor Rotativo para aplicación de transporte [Elaboración propia].</i>	32
<i>Tabla 4.1: Parámetros prototipo desarrollado por LUT [8].</i>	131
<i>Tabla 4.2: Parámetros prototipo lineal transformado del motor rotativo de 45 kW...</i>	143
<i>Tabla 4.3: Especificación de parámetros de MSLIP con núcleo ferromagnético [12].</i>	151
<i>Tabla 5.1. Datos de Fuerza de empuje (N) y Fuerza de rizado (N) en los modelos MSLIP-1 y MSLIP-2 según el ángulo de inclinación.</i>	165
<i>Tabla 5.2: Parámetros geométricos los dos modelos comparados del MSLIP-H</i>	172
<i>Tabla 5.3: MSLIP-H para varios valores de entrehierro modelado con varios ángulos de inclinación.</i>	181
<i>Tabla 5.4: Simulaciones realizadas del MSLIP-H .Mejor modelo de acuerdo al ratio Fe/Rizado.</i>	182
<i>Tabla 5.5: MSLIP-H modelado con varios ángulos de inclinación y entrehierro.</i>	185
<i>Tabla 6.1: Fuerzas comparadas del prototipo inicial y el TYP-7 inclinado 1/2 ts.</i>	201
<i>Tabla 6.2: Fuerzas de Empuje y Normal en TYP-7 y TYP-L a 3 A/mm<sup>2</sup>.</i>	206
<i>Tabla 6.3: Modelo TYP-Z con variación de ángulo de inclinación para distintos entrehierros.</i>	212
<i>Tabla 6.4: Simulaciones realizadas del MSLIP-H a estudiar y mejor modelo de acuerdo al ratio Fe/Rizado.</i>	214
<i>Tabla 6.5: MSLIP-H TYP-Z modelado con varios ángulos de inclinación y entrehierro.</i>	216
<i>Tabla 6.6: Fuerzas de Empuje y Rizado de los prototipos modelados de las nuevas topologías.</i>	222

## *ABREVIATURAS.*

<i>CO2:</i>	<i>Bióxido de Carbono, efecto invernadero.</i>
<i>IDAE:</i>	<i>Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.</i>
<i>UE:</i>	<i>Unión Europea.</i>
<i>GEI:</i>	<i>Gases de efecto invernadero.</i>
<i>VE:</i>	<i>Vehículo eléctrico.</i>
<i>PHEV:</i>	<i>(Siglas en inglés): vehículo eléctrico híbrido enchufable.</i>
<i>MLs:</i>	<i>Motores lineales.</i>
<i>MSLIP:</i>	<i>Motor síncrono lineal de Imanes permanentes.</i>
<i>fs:</i>	<i>Frecuencia de armadura o Estator.</i>
<i>Vs:</i>	<i>Velocidad de sincronismo.</i>
<i>LMDC:</i>	<i>Motores lineales de corriente directa.</i>
<i>LIM:</i>	<i>Motor lineal de inducción.</i>
<i>LSM:</i>	<i>Motor síncrono lineal.</i>
<i>LRM:</i>	<i>Motor lineal de reluctancia.</i>
<i>Stepping-Motor:</i>	<i>Motor paso - paso.</i>
<i>Maglev:</i>	<i>Motor Magnético de levitación.</i>
<i>ART:</i>	<i>Tren de Alta velocidad (Advanced Rapid Transit).</i>
<i>EMALS:</i>	<i>Sistema de lanzadera electromagnética de aeronaves (Electromagnetics Aircraft Launch System).</i>
<i>Crash Test:</i>	<i>Pruebas de choque.</i>
<i>FTA:</i>	<i>Administración Federal de Transito.</i>
<i>NdFeB:</i>	<i>Imanes de tierras raras (Neodimio, Hierro, Boro).</i>
<i>MSLIP-H:</i>	<i>Motor síncrono lineal de imanes permanentes en configuración Halbach.</i>
<i>PMSLM:</i>	<i>(Siglas en inglés del Motor síncrono lineal de imanes permanentes).</i>
<i>LBMs:</i>	<i>Motor lineal sin escobillas.</i>
<i>Slotted:</i>	<i>Con ranura.</i>
<i>Slotless:</i>	<i>Sin ranura.</i>
<i>Coreless:</i>	<i>Sin nucleo.</i>
<i>Ironless:</i>	<i>Sin hierro.</i>
<i>Surface PM:</i>	<i>Imán superficial.</i>
<i>Buried PM:</i>	<i>Imán Incrustado.</i>
<i>Halbach array:</i>	<i>Matriz Halbach.</i>

<i>Iron-cored:</i>	<i>Nucleo de hierro.</i>
<i>Cogging force:</i>	<i>Fuerza de diente.</i>
<i>Detent force:</i>	<i>Fuerza de retención.</i>
<i>Ripple:</i>	<i>Rizado</i>
<i>Thrust Ripple:</i>	<i>Rizado de Fuerza de empuje.</i>
$g_1$ :	<i>Espesor de entrehierro, m</i>
$I$ :	<i>Corriente de fase del primario, A</i>
$R$ =	<i>Resistencia del primario por fase, <math>\Omega</math></i>
$X_d$ :	<i>Reactancia en eje d del primario por fase, <math>\Omega</math></i>
$X_{dm}$ :	<i>Reactancia de magnetización en eje d, <math>\Omega</math></i>
$X_q$ :	<i>Reactancia en eje q del primario por fase, <math>\Omega</math></i>
$X_{qm}$ :	<i>Reactancia de magnetización en eje q, <math>\Omega</math></i>
$X_\sigma$ :	<i>Reactancia de dispersión del primario, <math>\Omega</math></i>
$V$ :	<i>Fasor de la esfuerzos de fase en los terminales, V</i>
$\delta$ :	<i>Ángulo de carga, rad</i>
$\eta$ :	<i>Eficiencia</i>
$\tau$ :	<i>Paso polar, m</i>
$f_p$ :	<i>Factor de potencia</i>
$\omega = 2\pi f$	<i>Frecuencia angular del primario, rad/s</i>
<i>MEF:</i>	<i>Método de elementos finitos.</i>
<i>VWM:</i>	<i>Siglas en ingles método de trabajo virtual.</i>
<i>MST:</i>	<i>Maxwell Stress Tensor (método tensor de esfuerzos de Maxwell).</i>
<i>FMM:</i>	<i>Fuerza Magneto motriz.</i>
<i>IP:</i>	<i>Imán permanente.</i>
$I_1$ :	<i>Corriente eficaz de estator.</i>
$X_0$ :	<i>Ángulo de carga mecánica.</i>
$F_e$ :	<i>Fuerza de empuje.</i>
$F_n$ :	<i>Fuerza normal.</i>
<i>FOC:</i>	<i>Control orientado a flujo.</i>
$\sigma$ :	<i>Conductividad.</i>
$\bar{v}$ :	<i>Velocidad</i>
$\bar{J}_s$ :	<i>Fuente de corriente</i>

$n$ :	<i>Es el vector normal a la superficie <math>S</math>.</i>
$L_i$ :	<i>Longitud de apilado.</i>
$l$ :	<i>Área o contorno de integración.</i>
$B_n$ :	<i>Componente normal de la densidad de flujo magnético.</i>
$B_t$ :	<i>Componente tangencial de la densidad de flujo magnético.</i>
$J$ :	<i>Densidad de corriente [<math>A/mm^2</math>].</i>
$P$ :	<i>Volumen de densidad de carga [<math>C/m^3</math>].</i>
$B$ :	<i>Es la densidad de campo magnético en Tesla (T).</i>
$H$ :	<i>Es la intensidad de campo magnético dado en Amperios por metro (<math>A/m</math>).</i>
$J_s$ :	<i>Es la densidad de la fuente de corriente en Amperios/metro cuadrado (<math>A/m^2</math>).</i>
$B_r$ :	<i>Campo magnético remanente.</i>
$\mu_0$ :	<i>Permeabilidad del vacío.</i>
$\mu_r$ :	<i>Permeabilidad relativa del material.</i>
$\nu_0$ :	<i>Reluctividad del vacío.</i>
$\nu_r$ :	<i>Reluctividad relativa del material, o la inversa de la permeabilidad.</i>
$PER$ :	<i>Potencial Escalar Reducido.</i>
$DPE$ :	<i>Diferencia de Potencial escalar.</i>
$PEG$ :	<i>Potencial Escalar General.</i>
$I_a$ :	<i>Corriente de fase de armadura.</i>
$m_1$ :	<i>Numero de fases.</i>
$P$ :	<i>Numero de pares de polos.</i>
$N_1$ :	<i>Numero de vueltas por fase en serie.</i>
$k_{\omega 1 \nu}$ :	<i>Factor de devanado.</i>
$\omega$ :	<i>Frecuencia angular corresponde a <math>2\pi f</math>.</i>
$N_1$ :	<i>Número de vueltas por fase del devanado de armadura.</i>
$k_{w1}$ :	<i>Coeficiente de devanado de armadura.</i>
$\Phi_f$ :	<i>Densidad de flujo magnético de excitación sin reacción de armadura cuyo armónico fundamental es <math>\Phi_{f1}</math>.</i>
$P_{elm}$ :	<i>Potencia electromagnética.</i>
$\vec{M}$ :	<i>Vector de magnetización.</i>



$\overrightarrow{M_{aire}}$ :	<i>Vector de magnetización en el aire.</i>
$\vec{n}$ :	<i>Vector normal a la superficie del imán desde un punto externo.</i>
$f_r$ :	<i>Coeficiente de rodamiento o rodadura.</i>
$M$ :	<i>Masa del vehículo.</i>
$g$ :	<i>Aceleración de la gravedad.</i>
$L\_ESTATOR$ :	<i>Es la longitud del estator tomada en la misma dirección del movimiento del deslizador (equivalente al rotor en el rotativo).</i>
$H\_ESTATOR$ :	<i>Es la longitud en dirección paralelo a los dientes de la armadura.</i>
$L\_MAQUINA$ :	<i>Es la distancia que equivale a la longitud axial del prototipo rotativo.</i>
$\tau_s$ :	<i>Paso de ranura.</i>
$Z_1$ :	<i>Número de ranuras.</i>
$2p$ :	<i>Número de polos del estator.</i>
$FFT$ :	<i>Transformada rápida de Fourier.</i>
$\Delta D$ :	<i>Distancia que se desplaza un extremo del imán sobre la base del deslizador con respecto al estator en la dirección del movimiento.</i>
$LIN45\_EST$ :	<i>Motor para las simulaciones en régimen estático.</i>
$LIN45\_TRA$ :	<i>Motor para las simulaciones en régimen dinámico.</i>
$TYPN5AG$ :	<i>Denominado nuevo modelo de Motor para simulaciones.</i>
$MSLIP-H\ TYP-C$ :	<i>Motor síncrono lineal de Imán permanente Halbach con topología C.</i>
$MSLIP-H\ TYP-7$ :	<i>Motor síncrono lineal de Imán permanente Halbach con topología 7.</i>
$MSLIP-H\ TYP-L$ :	<i>Motor síncrono lineal de Imán permanente Halbach con topología L.</i>
$MSLIP-H\ TYP-Z$ :	<i>Motor síncrono lineal de Imán permanente Halbach con topología Z.</i>



# CAPITULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

El sector transporte, tomado en su totalidad, es decir, incluyendo a los sub-sectores de automoción, aviación y transporte marítimo, es responsable del 23% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> relacionadas con el campo de la energía. Son la segunda causa de emisiones después de la generación eléctrica [1]. Tres cuartas partes de esas emisiones proceden, además, del transporte rodado: coches, camiones y autobuses. De acuerdo con los datos publicados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2011 [2]), el sector que supone un mayor consumo de energía en nuestro país es el sector transporte (40%).

De acuerdo a la política energética de la UE para los próximos años, para el año 2020 las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se deberán reducir en un 20% respecto a las medidas en 2002 [1]; en este contexto, se considera la electrificación del transporte como una de las principales líneas de actuación a considerar. Existe un interés constante en promover avances tecnológicos de aplicación al transporte público que proporcionen a los usuarios un medio de transporte seguro, eficiente, limpio, no ruidoso, económico y fiable.

El vehículo eléctrico (VE) o el vehículo eléctrico híbrido enchufable (PHEV siglas en inglés) juega un papel fundamental, no sólo por sus ventajas en cuanto a eficiencia (un motor de combustión se sitúa alrededor del 20% frente al 80 o 90% del motor eléctrico), o por su funcionamiento silencioso (el 75 % del ruido que se percibe en las ciudades procede del tráfico rodado), o por su capacidad para reducir las emisiones de GEI y contaminantes atmosféricos, sino también por el elevado potencial de integración a partir de fuentes renovables con el que cuenta el sector eléctrico [2, 3]. Los vehículos eléctricos, además no emiten malos olores y no contaminan la calzada ni producen líquidos residuales.

Habitualmente los vehículos eléctricos se alimentan mediante la energía almacenada en unos acumuladores; esto conlleva una serie de inconvenientes como son los medioambientales, económicos, restricciones en la autonomía del vehículo o el aumento del peso y volumen que el vehículo ha de reservar para alojar las baterías. Es por lo tanto un elemento a evitar.

Los sistemas de transporte con motores lineales (MLs) se alimentan con una tensión alterna trifásica aplicada convenientemente a las bobinas estatóricas que en MLs de estator largo se distribuyen en los raíles que fijan el recorrido del vehículo.

El sistema de propulsión con motor eléctrico lineal solo precisa del vínculo electromagnético entre los dispositivos móviles y fijos, eliminándose así la necesidad de un sistema de transmisión para convertir el movimiento rotativo en lineal, con las ventajas que esto conlleva como la reducción de los esfuerzos de adherencia por las ruedas motrices o la reducción de las necesidades de mantenimiento. De acuerdo a estas ideas, se propone la creación de un nuevo sistema de propulsión de autobús urbano que emplee un motor eléctrico síncrono lineal de imanes permanentes (MSLIP).

La investigación se centrará en el diseño del deslizador del motor elegido para la propulsión del autobús eléctrico; inicialmente se seleccionará el motor lineal de entre las topologías existentes para después mejorar sus características de modo que ofrezca una serie de ventajas frente a los propulsores montados en los autobuses públicos actuales.

El inconveniente fundamental de los MSLIPs es el elevado rizado en la fuerza de empuje, que ha de ser minimizado para garantizar el confort de la marcha. Además la elevada fuerza de atracción existente entre el primario y el deslizador de imanes, que incrementa la masa específica global del conjunto.

## 1.1 Motores síncronos lineales.

El rotor de un motor síncrono rotativo gira a la misma velocidad que lo hace el campo magnético del estator, siendo conocida esta velocidad como “velocidad de sincronismo”. Trasladando este concepto a los motores síncronos lineales, se establece la existencia de dos campos magnéticos, uno creado por el inductor del motor o armadura y el otro creado por el inducido o excitación. Ambos campos tienden a alinearse ya que buscan alcanzar el estado de mínima energía. Debido a ello, se creará una fuerza de empuje que permitirá al deslizador o parte móvil desplazarse linealmente, definiendo esta velocidad nuevamente como velocidad lineal de sincronismo [4]. Esta fuerza puede ser positiva cuando trabaja como motor o negativa cuando funciona como generador.

En el motor síncrono lineal, el devanado de campo, junto con su núcleo, se puede colocar en el elemento móvil y el devanado trifásico de la armadura con el núcleo laminado se coloca a lo largo de la trayectoria o pista que guiara el dispositivo móvil. El devanado de la armadura es alimentado sección por sección por una fuente de voltaje a frecuencia variable. La velocidad  $v_s$  del dispositivo móvil está relacionada con la frecuencia de armadura  $f_s$ , por la expresión:

$$v = v_s = 2\tau f_s = \frac{\omega}{\pi} \tau \quad (1.1)$$

Donde  $\tau$  es el paso polar.

Por lo tanto, las ondas de flujo magnético, tanto del campo como de los devanados del inducido viajan a la misma velocidad (la velocidad de sincronismo), respecto a un marco de referencia normalmente asociado a los devanados del inducido, a menudo conocido como carril-guía activo.

Se deduce de la teoría de la máquina síncrona de rotación que los campos magnéticos siempre y cuando el primario (o estator) y el secundario (o rotor) que viajan de forma síncrona, no tienen un desplazamiento cero espacial ( $B \neq 0$ ), se desarrolla una fuerza longitudinal en tiempo promedio diferente de cero.

En los motores síncronos lineales, existe una fuerza normal entre el primario y el secundario. Para un motor síncrono lineal con núcleo de hierro la fuerza normal es de atracción y puede exceder la magnitud de la fuerza longitudinal (también llamada fuerza de empuje). Siempre que sea posible, la fuerza normal se utiliza para compensar el peso del elemento móvil del MSL. En el caso de los motores síncronos lineales con núcleo de aire, la fuerza normal entre el primario y el secundario puede ser del tipo repulsión o atracción dependiendo del ángulo de carga [5].

El núcleo del estator en los motores síncronos puede estar construido con material de hierro o bien con un material no ferromagnético (generalmente una resina), caracterizándose este último por una menor densidad de flujo magnético. La excitación de un MSL se puede producir de varias formas: por bobinas excitadas con una fuente de corriente continua, por un sistema de excitación mediante superconductores o por imanes permanentes; por su simplicidad es esta última opción la de mayor aplicación en los MSL actuales [6].

## **1.2 Objetivos de la tesis**

El estudio que se presenta En esta tesis doctoral se presenta un estudio que tiene como objetivo el diseño y análisis del motor síncrono lineal más adecuado para una determinada aplicación de transporte. El modelo del motor se desarrollará mediante un programa de simulación por Elementos Finitos, combinando los análisis electromagnético, estático y vibracional. El trabajo se centra en el diseño electromagnético del motor lineal, con el objetivo de reducir las fuerzas que de forma indeseable intervienen en su funcionamiento, como es el caso de las fuerzas de retención o el rizado de la fuerza de empuje del motor.

### **1.2.1 Resumen de los objetivos de la tesis:**

Los principales objetivos de la tesis se centran en el diseño y análisis de un motor eléctrico lineal especialmente diseñado para el transporte masivo de personas o

mercancías. Se estudian los aspectos constructivos y operativos asociados a las máquinas lineales que permiten diseñar un prototipo útil para un sistema de transporte.

Los objetivos son, por lo tanto, los siguientes:

- Selección de la topología del motor lineal más apropiado como sistema de tracción.
- Diseño inicial de un modelo del motor lineal a partir de un motor rotativo de potencia equivalente mediante una herramienta de Elementos Finitos.
- Mejora de las características del motor desarrollado:
  - Incremento de la fuerza de empuje en relación al volumen del deslizador mediante el uso de la topología Halbach.
  - Estudio de técnicas de reducción del rizado de la fuerza de empuje que no afecten a su valor medio.
  - Análisis de la fuerza normal en relación al empuje y entrehierro requerido.
- Validación de los modelos desarrollados mediante la comparación de los resultados con los obtenidos en modelos desarrollados por otros autores.
- Propuesta de nuevas topologías del deslizador que reduzcan las restricciones que presenta los MSLIP convencionales; básicamente que consigan una reducción del rizado de la fuerza de empuje manteniendo su valor medio.

### **1.3 Introducción a las máquinas eléctricas lineales.**

La historia del motor lineal se remonta a la década de 1840, con las obras de Charles Wheatstone en Gran Bretaña (patentando el primer motor lineal en 1841) y del francés Paul-Gustavo Froment (1844); este último desarrolló un motor lineal que utiliza un electroimán para atraer a las barras de hierro montadas sobre un volante de inercia, eliminando la necesidad de conexiones mecánicas y por lo tanto reduciendo el número de piezas móviles. El motor de Froment fue eficiente y supuso un paso importante en el desarrollo del motor eléctrico moderno. En 1889, los norteamericanos Schuyler S. Wheeler y Charles S. Bradley presentaron una patente para la aplicación de un sistema de potencia ferroviario con motores lineales síncronos y asíncronos.

Las primeras patentes en Estados Unidos para un motor lineal aplicado a un tren se otorgaron al inventor alemán Alfred Zehden en 1907. Entre 1935 y 1941 al alemán Hermann Kemper patentó diversos motores lineales para propulsión de trenes de levitación magnética. A fines de 1940s, el profesor Eric Laithwaite del Imperial College en Londres trabajó en el desarrollo del primer modelo de tamaño completo [7].

Las principales aplicaciones del MSLIP han sido ampliamente descritas en la literatura existente [8], fijando su atención en todos aquellos accionamientos que requieren la combinación de varios motores enlazados y que han de mantenerse a la misma velocidad de forma estricta. Su aplicación ha sido especialmente ventajosa en la industria textil y en la del vidrio [9]. En estos últimos años el interés sobre este tipo de motor ha crecido, entre otras causas gracias al espectacular desarrollo de la electrónica de potencia. Además, el incremento de la disponibilidad de materiales magnéticos ha permitido construir potentes imanes permanentes y ha proporcionado la oportunidad de desarrollar MSLIPs aplicados al transporte; éstos, son motores de elevadas prestaciones en velocidad y rendimiento y con un reducido tamaño si se comparan con motores asíncronos de potencia equivalente.

El máximo exponente aplicado de este tipo de tecnología es, sin duda, el tren de levitación magnética o Maglev (Magnetic Levitation Vehicle siglas en inglés) operativo en Alemania, China y Japón. Con un sistema de propulsión basado en los motores lineales y aplicando el uso de electroimanes superconductores y bobinas laterales de levitación, estos sistemas Maglev se encuentran hoy al frente de la vanguardia tecnológica en transportes [10].

En la actualidad las maquinas lineales se encuentran en un alto grado de desarrollo industrial en determinadas aplicaciones y sectores. Existen una serie de características del motor lineal que lo diferencian del motor rotativo y que lo hacen muy interesante en determinados contextos y aplicaciones. Los motores lineales se basan en que la transmisión de la fuerza se realiza ahora directamente por el campo magnético. Sus principales ventajas respecto a los rotativos son:



- El motor lineal evita que haya que transformar el movimiento rotativo en uno lineal a través de sistemas mecánicos, que reducen el rendimiento del conjunto e incrementan el mantenimiento.
- Los espesores de entrehierro que se suelen emplear en los motores lineales son bastante mayores que en los motores rotativos, lo cual permite una mayor holgura mecánica que puede ser interesante en ciertas aplicaciones.
- Se pueden alcanzar grandes rendimientos con mayor densidad de potencia que la obtenida en los motores rotativos, lo que hace que el motor lineal sea especialmente interesante para aplicaciones de alta o muy alta potencia. Además, el desarrollo de los nuevos materiales magnéticos y conductores permiten soportar estas aplicaciones de potencia mucho más elevada de la que se podía alcanzar antiguamente.

Todo ello proporciona una serie de ventajas en aplicaciones de transporte sobre los accionamientos tradicionales basados en transmisiones mecánicas:

- Mayores valores de velocidad, pudiendo llegar hasta 300 m/min.
- Mayores valores de aceleración, lo que en muchas aplicaciones es más importante que el valor de la velocidad máxima.
- Reducción de los niveles de vibración y del ruido sin comprometer el grado de prestaciones.
- Mayor fiabilidad porque hay menos desgaste (la aceleración y el frenado no dependen de la fricción).
- Eliminan la necesidad de tener una alimentación en el deslizador para la propulsión del vehículo, por lo que el vehículo puede ser pasivo.

Evidentemente no todo son ventajas a la hora de comparar el motor lineal con el rotativo. La tecnología de fabricación del motor rotativo ya está muy estudiada y extendida; esto permite fabricar motores rotativos a muy bajo coste, lo que hace muy difícil competir en coste al motor lineal. Los motores lineales poseen un circuito magnético no continuo, es decir, tanto el dispositivo móvil (deslizador) como en el dispositivo estático (estator) tienen extremos y longitud finita. Esto hace que se presenten deformaciones o asimetrías del flujo magnético en los extremos de los

circuitos magnéticos (denominado “efecto de borde”); este efecto aumenta el rizado en el empuje del motor [11].

Otra de sus desventajas es la complejidad de los sistemas de control, que aunque factibles, suponen un sobre coste de dinero y de tiempo de diseño.

En concreto, en aplicaciones de transporte, el uso de motores lineales presenta una serie de inconvenientes [10]:

- Necesidad de disipación del calor que se genera; es necesario disponer de sistemas de refrigeración más complejos que el sistema de ventilador utilizado en motores rotativos.
- Presencia de fuerzas normales al movimiento de la máquina, que en motores rotativos, debido a la simetría coaxial, se anulan entre sí. Se trata de fuerzas que pueden causar esfuerzos en la estructura, en los sistemas de guiado y rodamientos, mayores desgastes, más ruido acústico y posibles vibraciones.

La siguiente **Tabla 1.1** resume la comparación de un motor lineal respecto a uno rotativo en una aplicación general, que podría ser la de transporte, objetivo de la tesis.

Tabla 1.1: Comparación de parámetros de un MSLIP con Motor Rotativo para aplicación de transporte [Elaboración propia].

PARÁMETROS	MOTOR ROTATIVO	MOTOR LINEAL
<b>Velocidad de avance</b>	Menor (transmisión indirecta del movimiento)	Mayor (transmisión directa del movimiento)
<b>Potencia en el arranque</b>	Menor (menor capacidad de potencia)	Mayor (mayor capacidad de potencia al desarrollar más velocidad en menos tiempo).
<b>Precisión</b>	Menor (no acoplamiento directo)	Mayor (acoplamiento directo)
<b>Costes de mantenimiento</b>	Mayores (movimiento rotativo)	Menores (movimiento lineal)
<b>Peso</b>	Mayor (peor relación potencia/peso)	Menor (mejor relación potencia/peso)
<b>Ruidos / vibraciones</b>	Menores (no existencia de fuerzas normales)	Mayores (existencia de fuerzas normales)
<b>Calentamiento</b>	Menor (sistemas de convección forzada sencillos)	Mayor (sistemas de refrigeración más complejos)
<b>Coste</b>	Menor	Mayor

Las máquinas lineales se pueden emplear en aplicaciones como generador, como es el caso de los generadores lineales que extraen energía de las olas [12]; pero la gran mayoría de las ocasiones se usan como motor. Los motores lineales, además de usarse en sistemas de transporte a tracción, se emplean fundamentalmente en las siguientes aplicaciones industriales:

- Sistemas de transporte y manipulación, por ejemplo sistemas de pórticos de dos o tres ejes, dispositivos de alimentación, equipos de tracción.
- Sistemas de pórticos de carga.
- Sistemas de embalaje.
- Sistemas de montaje y manipulación.
- Sistemas de procesamiento de madera.
- Sistemas de perforación y corte.
- Sistemas de prensas pequeñas.
- Fabricación de maquinaria de utilización específica.
- Mecanizado de alta velocidad.

### **1.3.1 Motores lineales. Clasificación.**

Uno de los parámetros clásicos en el desarrollo de una aplicación con motores eléctricos es la adecuación del par y/o de la velocidad del motor a la carga. Los motores convencionales generan una cinemática rotativa, de decenas de vueltas por segundo, y un par moderado. En cambio, es usual necesitar una cinemática lineal y/o de poca velocidad y/o de alto par. La aproximación histórica a este problema siempre ha venido de la mano de dispositivos mecánicos intermedios de transmisión. Para convertir el movimiento rotativo en lineal se ha recurrido tradicionalmente a sistemas de arrastre basados en husillos, correas o cremalleras, más los componentes requeridos para guiar linealmente el desplazamiento (patines, raíles, etc.). Para disminuir la velocidad de giro y aumentar el par disponible en el eje de salida, la solución universalmente adoptada ha sido el reductor, en cualquiera de sus variantes (de engranajes, sin fin/corona, planetario, etc.). Los motores lineales pertenecen al grupo de máquinas eléctricas especiales que convierten la energía eléctrica directamente en energía mecánica de movimiento de traslación.

El motor lineal también se puede definir como una máquina especial cuyo dispositivo móvil tiene un funcionamiento dinámico lineal; de un modo más preciso, un motor lineal consiste en un elemento primario denominado deslizador y un elemento secundario que se extiende a lo largo de la distancia que se va a recorrer [4]. En motores lineales la parte móvil puede ser bien la armadura o bien el sistema de excitación formado por los imanes permanentes.

Se puede establecer una primera clasificación de los motores lineales [10] que depende de la forma en que se produce el efecto de propulsión o de empuje en el motor.

Así, podemos distinguir entre motores lineales:

- Electrostáticos que basan su movimiento en las fuerzas de atracción y repulsión de las cargas eléctricas
- Piezoeléctricos, cuyo movimiento se produce por las vibraciones producidas en un material piezoeléctrico que es excitado por una fuente eléctrica
- De magnetostricción, que producen movimientos debido a las vibraciones que se producen en un material por los cambios de un flujo magnético y los electromagnéticos.
- Electromagnéticos.

En esta tesis nos centraremos en los motores lineales electromagnéticos: en este grupo se establece una clasificación adicional en tres tipos que son, los de corriente continua, de inducción y los síncronos.

Dentro del grupo de los motores lineales síncronos (MSL), se encuentran incluidos los de reluctancia, los de flujo transversal, los homopolares y los de imanes permanentes, siendo estos últimos el objeto de estudio del presente proyecto.

En el grupo de los motores lineales síncronos de imanes permanentes (MSLIP) existen los motores con armadura ranurada y los de armadura no ranurada. Respecto al inductor se encuentran los motores con imanes permanentes de montaje superficial, los de montaje interior y los de disposición Halbach.

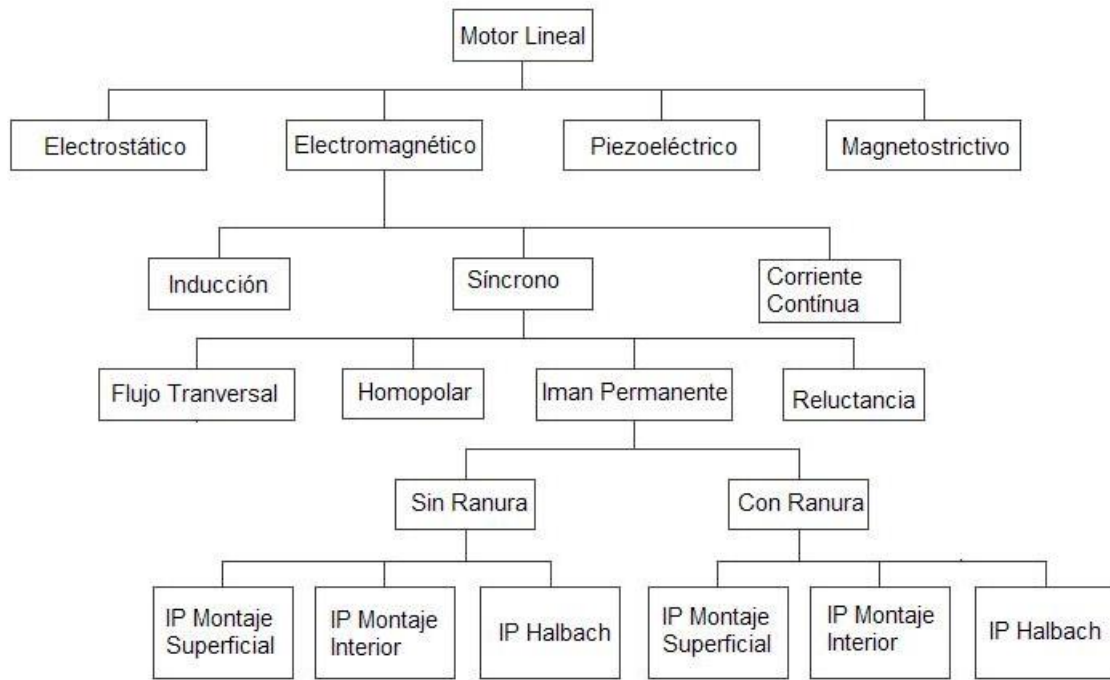


Figura 1.1: Clasificación del Motor Lineal. [Elaboración propia].

En la familia de los motores electromagnéticos lineales, los principales son los que se enumeran a continuación:

- Motores lineales de corriente directa MLDC.
- Motores lineales de Inducción (LIM).
- Motor Síncrono Lineal (LSM).
- Motor de Reluctancia (LRM).
- Motor Paso-Paso (Stepping Motor).
- Motor Oscilante.
- Motores híbridos.

En el capítulo 2 se detallarán las principales topologías de los distintos tipos de motores lineales así como sus principales aplicaciones.

Se resumen a continuación las principales aplicaciones de transporte que emplean motores lineales, centrándonos en los trenes de alta velocidad, con o sin levitación magnética.

## 1.4 Aplicaciones en sistemas de transporte.

### 1.4.1 Transporte por levitación magnética.

Se conoce como levitación magnética al fenómeno por el cual un material dado puede levitar gracias a la repulsión existente entre los polos iguales de dos imanes o debido a lo que se conoce como “Efecto Meissner” [13], propiedad inherente a los superconductores. Hoy en día el uso más extendido del fenómeno de levitación magnética se da en los trenes de levitación magnética, en los que se usa el motor lineal síncrono.

Un tren de levitación magnética es un vehículo que utiliza las ondas magnéticas para suspenderse por encima del carril (desde 1 cm hasta 15 cm) e impulsarse a lo largo de un carril-guía. Estos trenes son también conocidos como trenes Maglev [14].

Los trenes Maglev usan motores lineales síncronos en los que la corriente alterna del inductor (bobinas trifásicas situadas en las vías) interactúa con el inducido (electroimanes o bobinas superconductoras del tren) creando una sucesión de polos norte y sur que empujarán y tirarán del vehículo hacia delante, como se muestra a continuación **Figura 1.2** [14].

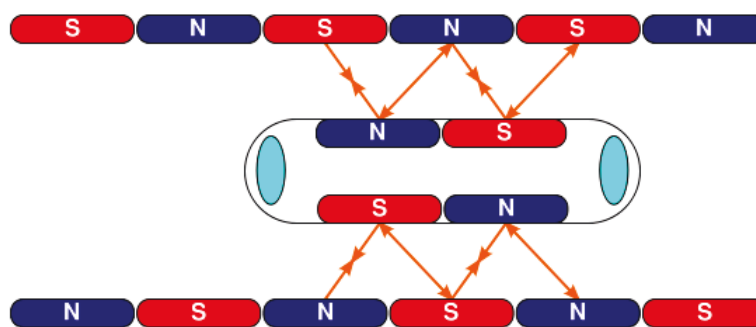


Figura 1.2: Sistema de propulsión de un tren Maglev [14].

Los trenes Maglev, gracias a su sistema de propulsión, son capaces de circular por desniveles de hasta 10 grados, en contraste con los trenes convencionales que sólo pueden circular por pendientes con desniveles de hasta 4 grados [**Figura 1.3**].

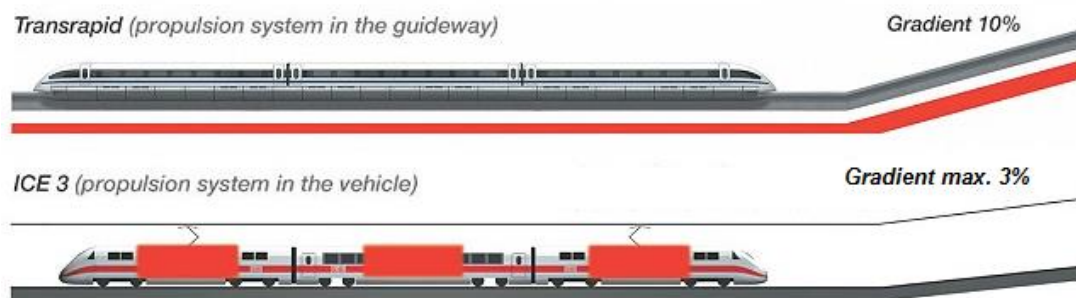


Figura 1.3: Ascenso de pendiente de un tren Maglev respecto a uno convencional [15].

Además, la velocidad alcanzada por estos trenes es superior a la del tren eléctrico convencional (llega hasta 500 km/h) y con un consumo hasta un 40% menor, todo ello debido a la ausencia de rozamiento mecánico. Alemania, China o Japón son algunos ejemplos de países que ya han desarrollado estos trenes:

- Transrapid (Shanghái, 2004).
- JR-Maglev (Japón, 1972).
- Aeropuerto de Birmingham (Reino Unido, 1984-1995).
- M-Bach (Berlín, 1989-1991).
- HSST: Linimo, línea en Aichi (Japón, 2005).

Esta tecnología también se usa en otras aplicaciones además de en trenes, como en las montañas rusas de levitación magnética o en la propulsión de naves espaciales (bajo investigación).

#### 1.4.2 Trenes de Alta Velocidad ART (Advanced Rapid Transit)

De forma similar a los trenes eléctricos convencionales (propulsados por motores de inducción rotativos habitualmente), se dan algunos ejemplos de trenes propulsados con motores lineales de inducción sin levitación magnética gracias a su alta velocidad, bajos costes operativos y de mantenimiento. Además, en cuanto a ventajas constructivas, el menor tamaño y la forma más aplanada de los motores lineales de inducción así como la falta de una transmisión conectada a las ruedas permite a este tipo de trenes circular mucho más cerca del terreno que los convencionales. Otra de las principales ventajas

constructivas es la disposición física de los dispositivos del motor lineal: tomando el efecto de atracción magnética inversa que ligera el peso del vehículo y logra reducir las fuerzas normales de atracción para mejorar su sistema de levitación, reduciendo considerablemente la fricción [16].

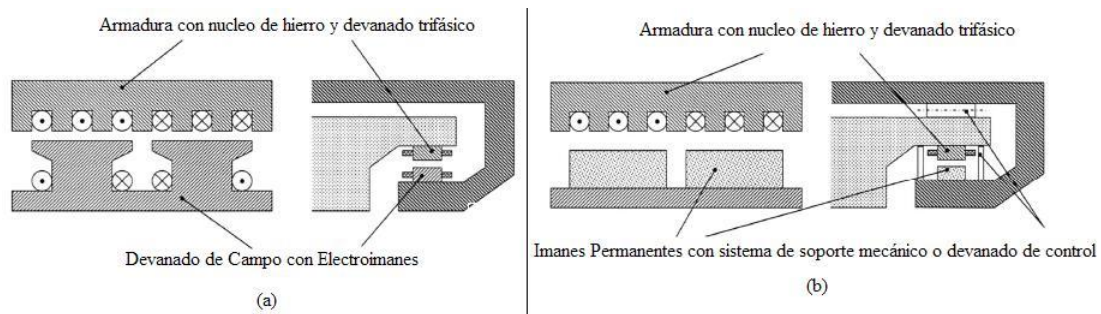


Figura 1.4: Aplicación de transporte con MSLIP con fuerza vertical de atracción [16].

Las características principales de este diseño son que están contruidos con estator largo de núcleo ferromagnético y devanado trifásico y utilizan la fuerza vertical de atracción; el modelo de la **Figura 1.4 (a)** es un Emsland, (Transrapid, 355 km/h; tienen secundario con bobinas de excitación en continua por lo que requiere baterías a bordo). El modelo de la **Figura 1.4 (b)** es un M-Bahn, Vehículo con ruedas y sistema de muelles para control mecánico de la levitación [16].

La principal empresa que se dedica a la construcción de estos trenes es Bombardier Innovia Art, que ya ha instalado este transporte en ciudades importantes como Detroit, Nueva York, Vancouver [**Figura 1.5**] o Beijing. Destacan los siguientes:

- Línea de Kelana Jaya (Kuala Lumpur, 1998).
- Scarborough RT (Toronto, 1985).
- SkyTrain (Vancouver, 1985).
- Línea de \_agahori Tsurumi-ryokuchi (Osaka, 1990).
- Línea de Toei Oedo (Tokio, 1991).
- Línea de Kaigan (Kobe, Japón, 2001).
- AirTrain JFK (Nueva York, 2003).
- Línea de Aanakuma (Fukuoka, Japón, 2005).
- Línea de Imazatosuji (Osaka, 2006).





Figura 1.5: ART en Vancouver (Canadá) [17].

### 1.4.3 Metro.

De forma similar a la aplicación en el tren de alta velocidad, tampoco se usa levitación magnética, en este caso. Sus ventajas se basan en su mayor facilidad para vencer las pendientes y su estabilidad en las curvas que por un lado permite ubicar estas líneas de metro en túneles de menor sección que los convencionales y por otro mejora la seguridad; además de por su alto rendimiento, menor coste y ruido [14]. Es habitual esta aplicación en China y Japón; especialmente en áreas de marco geológico complejo, que impliquen fuertes pendientes y numerosas curvas **[Figura 1.6]**.



Figura 1.6: Metro de Guangzhou (China) [18].

#### 1.4.4 Monorraíl.

Además del uso ya comentado en trenes de alta velocidad y metro, existe otro ejemplo de tracción ferroviaria sin levitación magnética que usa el motor lineal: el monorraíl de Moscú, donde se implementaron estos motores por su mejor comportamiento bajo las condiciones climatológicas extremas de este país [ver **Figura 1.7**].



Figura 1.7: Vía del monorraíl de Moscú [19].

#### 1.4.5 Sistemas de propulsión.

Una de las últimas tendencias en investigación sobre los motores lineales eléctricos es su aplicación en sistemas de propulsión, los llamados EMALS (Electromagnetics Aircraft Launch System) Sistema de Lanzadera electromagnética de aeronaves. Para estas aplicaciones se necesita desarrollar una gran potencia en muy poco recorrido, como es el caso de las pruebas de choque (Crash Tests) en los laboratorios para estudiar las consecuencias del impacto de un vehículo en movimiento, o el caso del despegue de aviones en portaaviones.

En el caso de los portaaviones, el motor lineal junto con su sistema de control y un almacén de energía harían de ‘catapulta’ para el despegue rápido del avión [14]. Estos motores deben estar preparados para soportar todas las condiciones que se den en la cubierta de vuelo y cualquier escenario operativo. Este nuevo sistema frente al convencional impulsado por vapor presenta como ventajas que el transporte de energía

en cables es mucho más seguro que el de vapor en conductos; además que estos motores permitirían lanzar aviones con más peso y usando menos personal para la operación. También se consigue reducir los esfuerzos de fatiga en los aviones al acelerar gradualmente.

Actualmente se están desarrollando en los Estados Unidos [20] (bajo supervisión de la Administración Federal de Tránsito (FTA), en el programa Burbank Maglev), dos sistemas de propulsión con levitación magnética de imanes de NdFeB. Los imanes de NdFeB hoy son suficientemente fuertes magnéticamente y estables térmicamente como para ser usados en motores lineales y sistemas de levitación magnética. Tales sistemas son el Magnemotion [21] (que utiliza imanes permanentes de NdFeB para la levitación electromagnética, y electroimanes de control que actúan para estabilizar la suspensión) el M3 System (Action MA) Sistema (San Diego, CA) y el General Atomics [21-23]. El sistema General Atomics utiliza dos conjuntos de imanes de NdFeB Halbach que levitan sobre un estator, un motor lineal síncrono de estator largo proporciona la propulsión.

## **1.5 Estructura de la memoria.**

El estudio de esta tesis se ha estructurado de la siguiente manera:

- *Capítulo 1:* En este capítulo se plantea la importancia del tema que motiva a estudiar el diseño de los MSLIP en configuración Halbach. Se hace una introducción a la investigación que se centrará en el diseño del deslizador del motor elegido para la propulsión del autobús eléctrico; también se hace una breve descripción a la introducción de las máquinas eléctricas lineales, su clasificación y aplicaciones del motor lineal a un sistema de transporte.

- *Capítulo 2:* En este capítulo se describe el estado del arte de los motores síncronos lineales de imanes permanentes, su clasificación de acuerdo al sistema de excitación y funcionamiento de acuerdo a las diferentes topologías existentes; se estudian también las fuerzas presentes en los MSL con imanes permanentes en disposición Halbach, métodos de mejoras en cuanto a rendimiento y reducción de

fuerzas que afecta el funcionamiento eficiente del motor lineal y una breve descripción del sistema de control aplicado.

- *Capítulo 3:* Este capítulo explica de forma breve el método de elementos finitos y la teoría de electromagnetismo aplicada al motor lineal síncrono de imanes permanentes. También da una explicación gráfica de la forma como se forma el campo magnético en los imanes permanentes cuando se disponen en configuración Halbach y se describen las ecuaciones analíticas que lo representan.

- *Capítulo 4:* Presenta el estudio del diseño del MSLIP en disposición Halbach para aplicaciones en sistemas de transporte; se realiza el cálculo de la fuerza de propulsión necesaria a partir del estudio de las fuerzas de empuje de un modelo mecánico. Los valores del diseño inicial del MSLIP, son extraídos del modelo de un motor síncrono rotativo de imanes permanentes de 45kW desarrollado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de “Lappeenranta University of Technology LUT (Finlandia)”; se explica la transformación topológica del motor rotativo a motor lineal síncrono de imanes permanentes en configuración Halbach. Finalmente se validan los resultados obtenidos del modelo convertido en lineal mediante la simulación de MSLIP-H similar del que se dispone de resultados con contraste experimental.

- *Capítulo 5:* En este capítulo se propone una serie de mejoras en el diseño del MSLIP en configuración Halbach realizado en capítulo 4; estas mejoras se inician con el análisis de fuerza de empuje, rizado y vibración de dos modelos de MSLIP-H con diferente ranurado estatórico. Se aplica una técnica de reducción de la fuerza de retención a partir de una adecuada relación entre la longitud del imán permanente y el paso de ranura estatórico y finalmente se estudia el efecto de la inclinación de los imanes sobre el MSLIP-H inicial.

- *Capítulo 6:* En este capítulo se propone el estudio de nuevas topologías del MSLIP-H para mejorar el diseño realizado con el objetivo de que estos prototipos mejoren la fuerza de propulsión y reduzcan el efecto de la vibración y la fuerza normal o de atracción.

- *Capítulo 7:* Este capítulo expone las conclusiones obtenidas, los aportes y las publicaciones realizadas en esta tesis.

## Referencias

- [1] E. Zapater. II. LA SEGURIDAD ENERGÉTICA DE LA UNIÓN EUROPEA EN EL CONTEXTO DE LA NUEVA POLÍTICA ENERGÉTICA Y EL TRATADO DE LISBOA. *La Energía Del Siglo XXI: Perspectivas Europeas Y Tendencias Globales* pp. 49. 2009.
- [2] (2012). *Movilidad Sostenible y Vehículos Eléctricos* [Movilidad Eléctrica - IDAE]. Available: [http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_Movilidad\\_Electrica\\_ACC\\_c603f868.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_Movilidad_Electrica_ACC_c603f868.pdf).
- [3] V. PROYECTO. (). *MEMORIA TÉCNICA PROYECTO VERDE*. <http://cenitverde.es/noticias/presentacion-del-proyecto-verde-en-la-iv-conferencia-europea-2013-the-european-framework-programmes-from-economic-recovery-to-sustainability>; Available: <http://www.cenitverde.es/>.
- [4] J. Gieras F., Z. Piech J. and B. Tomczuk Z. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems* (Second Edition ed.) 2012 Vol 20.
- [5] S. A. Nasar and I. Boldea, *Linear Electric Motors*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [6] D. G. Martínez, ""Optimización del comportamiento dinámico de Motores Lineales Sincronos de Imanes Permanentes"." pp. 14-15, junio 2005.
- [7] R. Hellinger and P. Mnich. Linear motor-powered transportation: History, present status, and future outlook. *Proceedings of the IEEE 97(11)*, pp. 1892-1900. 2009. . DOI: 10.1109/JPROC.2009.2030249.
- [8] M. Donsión P. and Ferro, M., A., F. *Motores Sincronos De Imanes Permanentes* 1990.
- [9] K. J. Binns, W. R. Barnard and M. A. Jabbar. Hybrid permanent-magnet synchronous motors. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution Of 125(3)*, pp. 203-208. 1978. . DOI: 10.1049/piee.1978.0053.
- [10] L. Massagues Vidal. Aportaciones al estudio de los motores de inducción magnetohidrodinámica. 2001. Available: Universitat Politècnica de Catalunya.
- [11] J. Gieras F. and Z. Piech J., *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems*. Electric Power Engineering Series, 2000.
- [12] L. Szabo and C. Oprea. Wave energy plants for the black sea possible energy converter structures. Presented at Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. International Conference On. 2007, .
- [13] J. A. Díaz Garcia. Sistematización del diseño de dispositivos de levitación superconductora por efecto meissner. 2008.

- [14] Y. Yao, G. Ni, Y. Fang and G. Hu. The computation of mechanical dynamic characteristic in EMS-maglev system by electro-mechanical equations coupled finite element analysis. *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* 25(1), pp. 225-230. 2007.
- [15] (2010). *Transrapid Tenerife Tenerife*. Available: <http://www.transrapidtenerife.com/steigungen-transrapid.php>.
- [16] R. Hellinger and P. Mnich, "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook." vol. 97, pp. 1892-1900, November 2009.
- [17] (2013). *BOMBARDIER INNOVIA ART - Vancouver, Canada*. [ART (Advanced Rapid Transit)]. Available: <http://www.bombardier.com/en/transportation/projects>.
- [18] (). *Guangzhou Subway, China* [Railway]. Available: <http://www.railway-technology.com/projects/guangzhou/>.
- [19] (). *THE MONORAIL SOCIETY*. Available: <http://www.monorails.org/tmspages/Moscow02.html>.
- [20] M. Thompson T. Practical issues in the use of NdFeB permanent magnets in maglev, motors, bearings, and eddy current brakes. *Proc IEEE* 97(11), pp. 1758-1767. 2009.
- [21] S. Jang M., D. You J., S. Lee H., H. Cho W. and W. Jang B. Design and analysis of three types for permanent magnet linear synchronous machine. *Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference On* 1pp. 31-33 vol.1. 2003.
- [22] C. Jiefan and W. Chengyuan. Thrust experiment and simulation of permanent magnet linear motor. Presented at Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference On. 2003.
- [23] I. S. Jung, J. Hur and D. S. Hyun, "3D analysis of permanent magnet linear synchronous motor with magnet arrangement using equivalent magnetic circuit network method." *IEEE Trans. Magn*, vol. 35, pp. 3736-3738, Sept 1999.





# CAPITULO 2

## 2. ESTADO DEL ARTE.

Este capítulo tiene como objetivo aportar al lector información acerca del desarrollo y estado actual de la tecnología asociada a los motores síncronos lineales, principalmente del motor síncrono lineal de imanes permanentes (MSLIP).

### 2.1 Motores Síncronos Lineales (MSL).

Los MSLs se clasifican fundamental en base a su excitación y atendiendo a diversos aspectos de la misma: disposición geométrica, existencia o no de devanados o configuración de los mismos.

Según la disposición geométrica los MSLs, así como sus homólogos rotativos, pueden estar contruidos como heteropolar (**Figura 2.1**) o como homopolar (**Figura 2.2**). Los MSL con la topología homopolar conocida también como tipo inductor, tanto su inducido como el devanado de campo están localizados en el mismo núcleo, generalmente en el dispositivo móvil.

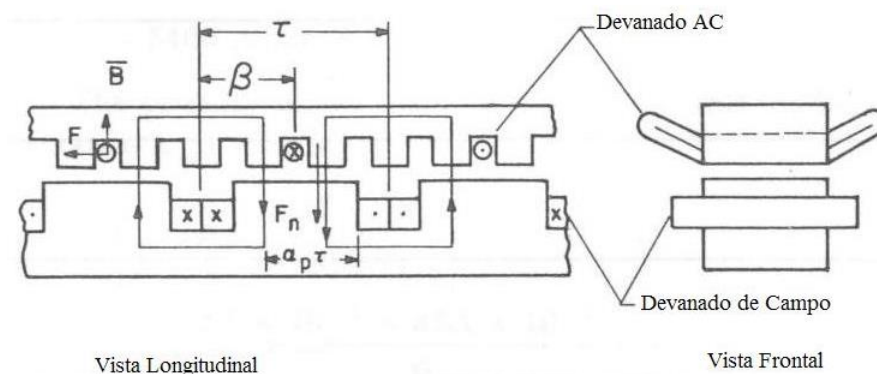


Figura 2.1: Topología heteropolar de un MSL [2].

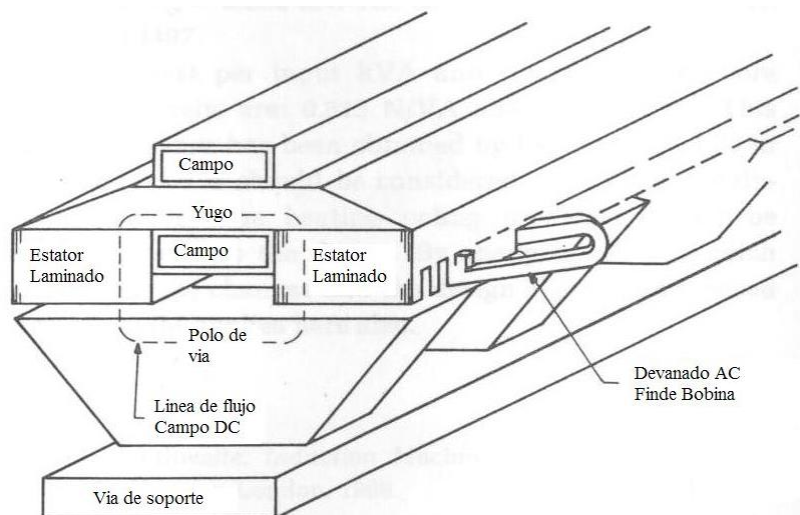


Figura 2.2: Topología homopolar de un MSL [2].

Los MSL de las **Figuras (2.1 y 2.2)** son ambos monoláteros en que sólo hay una superficie de interacción entre el campo de excitación DC y el campo producido por el devanado de armadura [2].

Las topologías de los MSL heteropolares son maquinas con flujo longitudinal, es decir el flujo sigue una ruta perpendicular al devanado activo y en la misma dirección del movimiento, por lo contrario, los MSL homopolares son de flujo transversal y la ruta que siguen es en un plano transversal a la dirección del movimiento.

La sustitución de electroimanes d.c. por imanes permanentes es común, a excepción de los motores lineales síncronos para los vehículos de levitación magnética. Los motores lineales síncronos de imanes permanentes y los motores lineales de corriente continua, se pueden dividir en dos grupos:

- Motor lineal síncrono de imanes permanentes (en inglés: Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM) cuya forma de onda de la corriente de entrada es sinusoidal y produce el movimiento del campo magnético.
- Motores lineales sin escobillas (Linear Brushless Motors, LBMs siglas en ingles) con realimentación de posición en el cual la alimentación de corriente tiene forma de onda trapezoidal o rectangular y se sincroniza con la velocidad y la posición de la parte en movimiento [1].

Los MSL también se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo a la configuración del sistema de excitación: los MSL doblemente excitados y los MSL con excitación individual:

Dentro del grupo de los MSL doblemente excitados distinguimos las siguientes configuraciones:

1. Una de las partes del motor contiene el devanado de armadura, y puede ser el elemento móvil o el fijo; la otra parte contiene los electroimanes o campo de excitación.
2. El devanado de la armadura puede ser un miembro móvil o fijo y el campo de excitación los forman los imanes permanentes.
3. En configuración homopolar con el campo y la excitación de armadura sobre un mismo dispositivo móvil o fijo; el otro elemento es pasivo.
4. En configuración heteropolar con el campo y la excitación de armadura sobre un mismo dispositivo móvil o fijo; el otro elemento es pasivo.

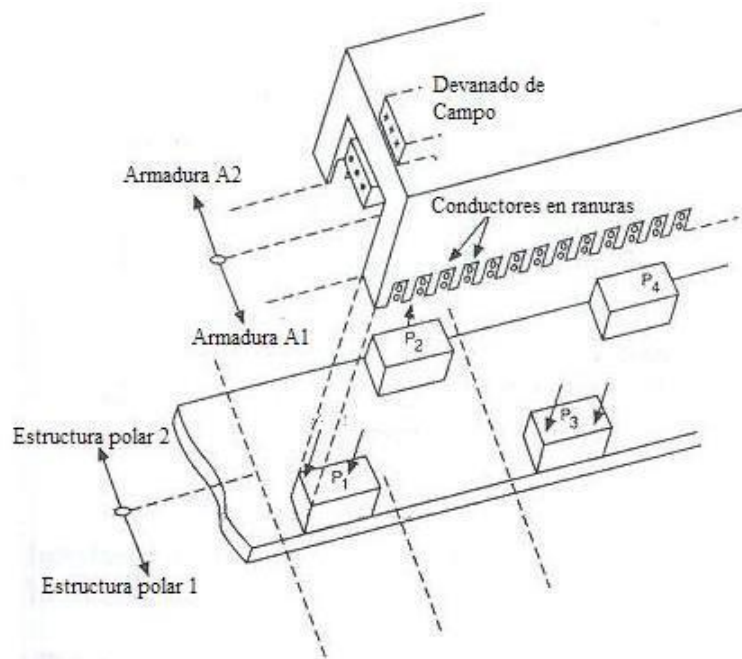


Figura 2.3: MSL Configuración homopolar doble excitación de polos salientes [4].

La **Figura 2.3** es un modelo de la estructura de un MSL de doble excitación de inducido y con flujo de campo en el mismo dispositivo. Cada uno de los inducidos reacciona con su estructura polar o línea de polos salientes. Este MSL es de configuración homopolar debido a que forma el flujo longitudinalmente a lo largo del inducido. El devanado de armadura reacciona con la componente sinusoidal de la distribución de flujo del campo para crear el empuje electromagnético del motor; la densidad de flujo máxima tendrá su límite con el nivel de saturación y la densidad de flujo mínima dependerá de las características de flujo remanente del circuito magnético.

La desventaja de estos MSL homopolares es que generalmente son de gran peso debido a que el circuito magnético debe ser diseñado para manejar el flujo de campo promedio que no contribuyen al empuje. Su gran peso, su gran volumen, y una alta variación de la reactancia son algunas de las desventajas de esta máquina, que para algunas aplicaciones requiere de circuitos amortiguadores para reducir los efectos de los flujos de dispersión por las reactancias.

Un MSL de configuración heteropolar o de flujo transversal es mostrado en la **Figura 2.4**.

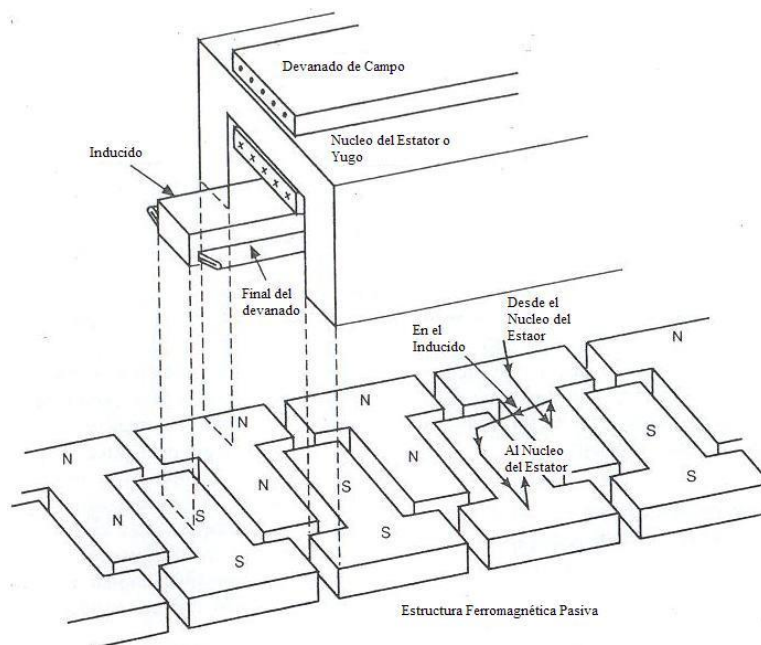


Figura 2.4: MSL en configuración Heteropolar con Campo y Devanado del Inducido en el mismo dispositivo y Estructura ferromagnética pasiva [4].

La **Figura 2.4** muestra el devanado de inducido enfrentado a un campo heteropolar convencional en la parte central de la estructura ferromagnético pasiva. El flujo de campo pasa a través del yugo que envuelve el inducido formando las polaridades norte y sur en la estructura ferromagnética pasiva. Esta máquina no tiene ningún componente intermedio del flujo en el entrehierro como en la máquina homopolar. El flujo de campo, sin embargo, tiene que atravesar el entre hierro cuatro veces como se observa en la figura 2.5. Esta máquina también presenta como desventaja, un gran peso y alta dispersión de flujo por los polos de la estructura ferromagnética pasiva y en investigaciones anteriores se ha demostrado que es una máquina demasiado pesada para todas las aplicaciones prácticas [4].

Dentro del grupo de los MSL con excitación individual se distinguen dos configuraciones:

1. Máquina en configuración síncrona de reluctancia con devanado de armadura sobre un miembro móvil o estacionario, el otro miembro pasivo.
2. Máquina en configuración síncrona de reluctancia con devanado auxiliar de armadura sobre un miembro móvil o estacionario, el otro miembro pasivo; este motor se mueve a velocidad síncrona constante.

En aplicaciones para sistemas de transporte, como se vio en el capítulo 1, el vehículo suele estar situado en el dispositivo corto y el largo suele estar dispuesto en las guías a nivel de tierra [4]. Esta será la disposición de los dispositivos a utilizar en la presente tesis.

Un modelo de MSL doblemente excitado con electroimanes es mostrado en la **Figura 2.5**.

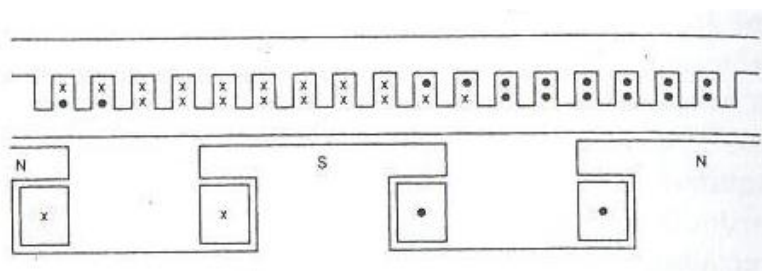


Figura 2.5: MSL con excitación de campo doble excitado con electroimanes [4].

Los MSL con excitación individual no tienen excitación de campo, este motor lineal es homologo al motor rotativo de reluctancia, el devanado primario es similar al devanado del inducido de una máquina de inducción lineal o al devanado de un MSL de excitación doble.

El otro dispositivo del MSL es una estructura de polos salientes. La **Figura 2.6** muestra esta configuración.

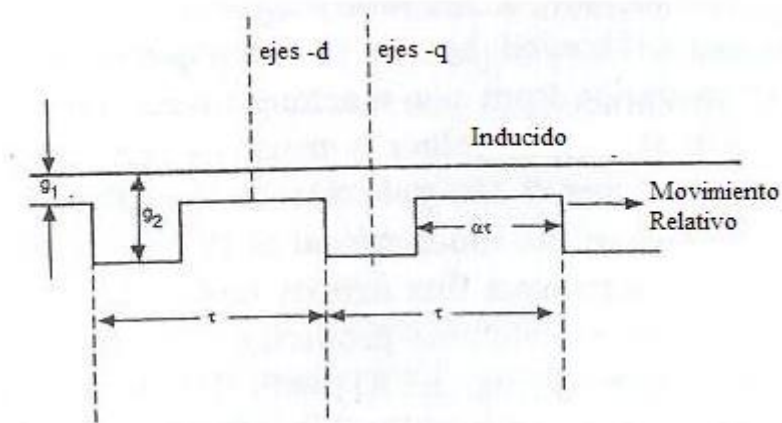


Figura 2.6: MSL con excitación individual de polos salientes (Motor lineal de reluctancia) [4].

Esta topología presenta la característica que la reluctancia en el entrehierro es una función que depende de la posición relativa de los dos dispositivos de la máquina; el empuje generado por la fuerza de reluctancia en este motor es similar al par de reluctancia de los motores síncronos rotativos.

Otra topología de maquina con excitación individual es la máquina de reluctancia vernier o de precisión. La **Figura 2.7** muestra un Motor Lineal Vernier. Los movimientos de los miembros se desplazan a una velocidad de subsincronismo dada por  $v = \frac{v_s}{N}$  donde el factor N depende de cada diseño particular del motor.

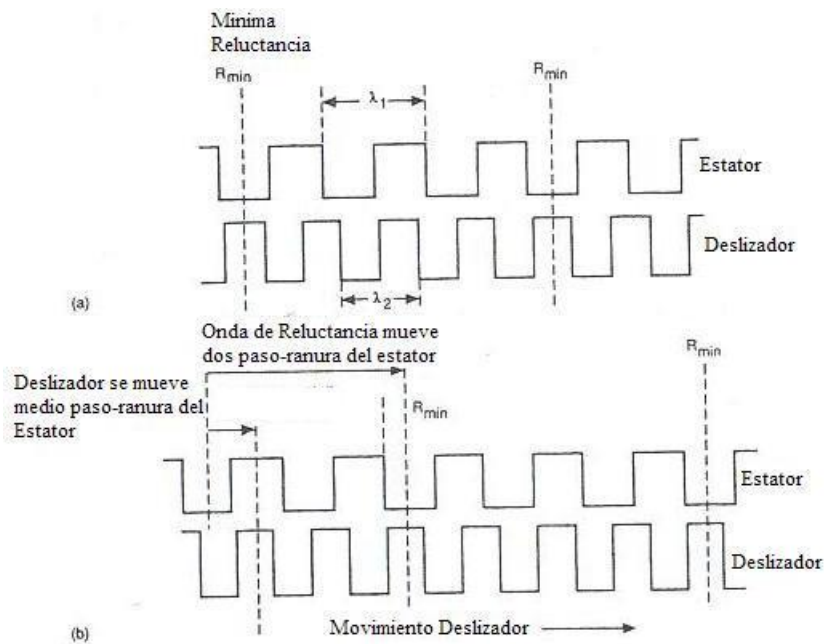


Figura 2.7: Estructura de Doble-ranura de un Motor Lineal Vernier [4].

Otras topologías de motores síncronos lineales son los tubulares. Estos motores básicamente se diseñan tomando un motor lineal plano y enrollándolo a lo largo de la longitud del inducido en la misma dirección de movimiento. Los motores tubulares son adecuados particularmente para aplicaciones de recorrido corto.

La **Figura 2.8** muestra la topología de un motor síncrono lineal tubular de imanes permanentes [2].

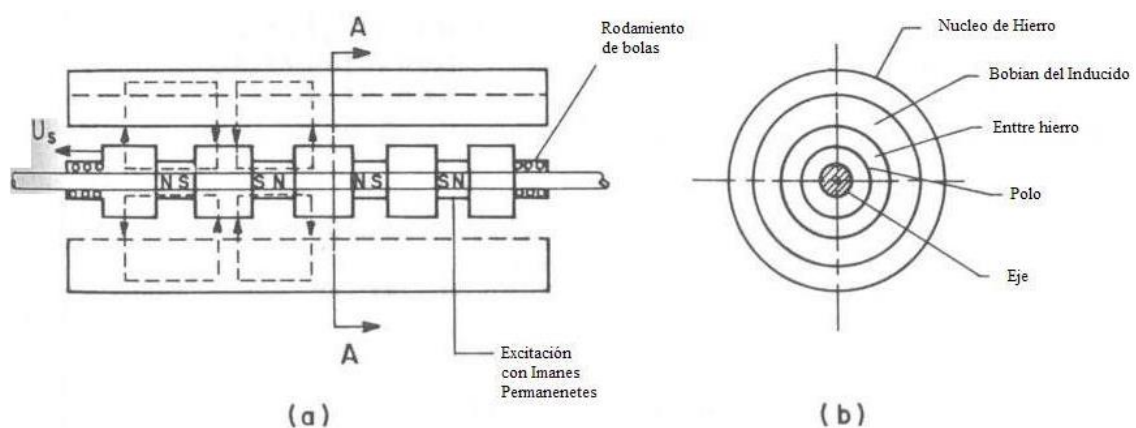


Figura 2.8: Topología de MSL\_Tubular de Imanes Permanentes [2].

A continuación la **Figura 2.9** muestra una clasificación amplia de los MSL en función del sistema de excitación.



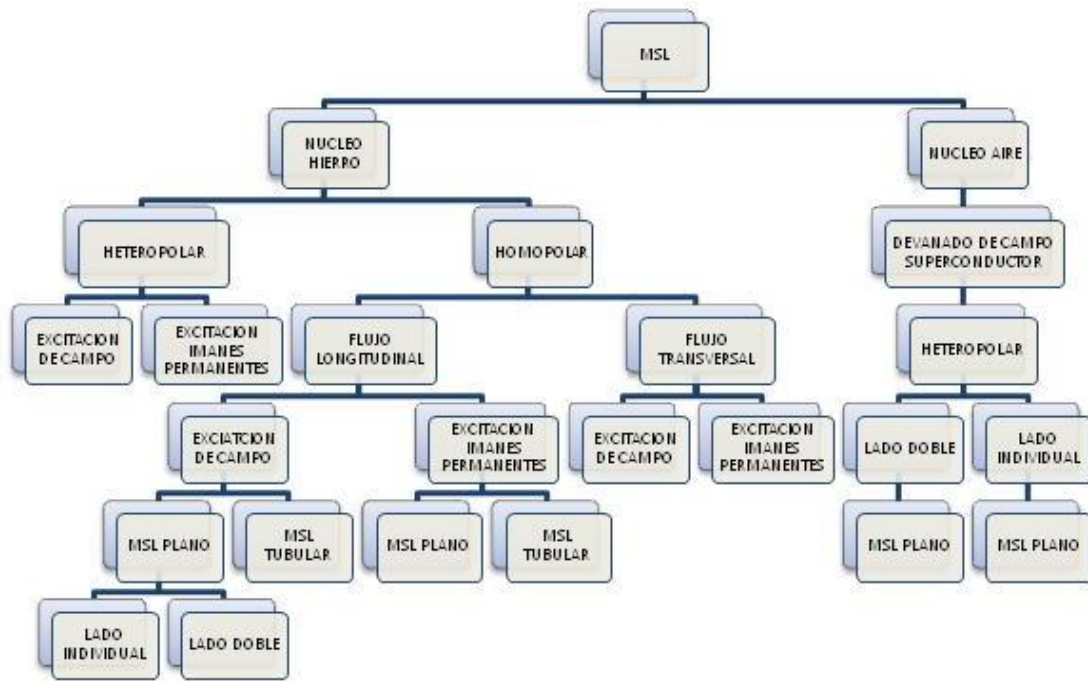


Figura 2.9: Clasificación de MSL de acuerdo al sistema de excitación [4].

Dentro de las muchas clasificaciones que existen de los motores lineales destacan los motores de excitación electromagnética como los descritos anteriormente, los que tienen su devanado de campo con superconductores como son los de levitación magnética y los de excitación por imanes permanentes, siendo estos últimos el objeto de estudio del presente trabajo.

## 2.2 Motor síncrono lineal de imanes permanentes (MSLIP).

Antes de abordar cualquier tipo de análisis electromagnético o mecánico que incluya al motor síncrono lineal de imanes permanentes (MSLIP), es indispensable mostrar las características físicas y de funcionamiento del mismo. Para ello, se presenta una clasificación de los diversos tipos de MSLIPs y una breve descripción de su funcionamiento.

### 2.2.1 Clasificación. Topologías de los MSLIP.

En el grupo de motores síncronos lineales de excitación por imanes permanentes (MSLIP) se puede realizar una clasificación que depende de las características



constructivas de la armadura. Así, se distinguen: MSLIP de armadura con ranuras en el núcleo magnético (en inglés: *slotted*), armadura sin ranuras en el núcleo magnético (en inglés *slotless*) y armadura sin núcleo magnético (en inglés: *coreless*). En todos los casos, los imanes de la excitación pueden ser superficiales (en inglés: *Surface PM*), incrustados (en inglés: *Buried PM*), en el interior del núcleo magnético (en inglés: *Interior PM*) o en disposición Halbach (en inglés: *Halbach array*).

Los imanes permanentes se utilizan para suministrar el campo de excitación en los motores síncronos lineales. Los imanes podrán estar localizados entre dos polos adyacentes o en un mismo polo. Por características mecánicas los MSLIP tienen algunas limitaciones tales como grandes y variables entrehierros, esto provoca una alta reluctancia con comportamiento irregular en el motor. Para corregir estos factores, se necesitará unos imanes especiales que tengan una gran fuerza coercitiva, dichos imanes son los que pertenecen a la familia de tierras raras.

Los MSLIP pueden clasificarse, atendiendo a diferencias constructiva, dentro de los siguientes grupos:

- De Estator corto o Estator largo.
- Monoláteros o Biláteros.
- Planos o Tubulares.
- De flujo Longitudinal o de flujo Transversal.
- Con Núcleo Ferromagnético o sin Núcleo Ferromagnético.
- De armadura ranurada o de armadura sin ranurar.

#### **a. Estator corto – Estator largo.**

La clasificación del motor lineal de estator corto o estator largo, se define dependiendo de la posición de la parte activa y la parte reactiva del motor síncrono lineal de imanes permanentes, es decir, para un sistema de propulsión lineal de Estator-Corto, el estator y el convertidor de frecuencia están instalados en el dispositivo móvil del vehículo y la parte reactiva esta fija a lo largo de la pista o guías. Esto incrementa los costos de diseño del dispositivo móvil, ya que necesita un sistema de transmisión de

potencia para alimentar el sistema de tracción del vehículo, sin embargo la parte pasiva permanece constante.

Para un sistema de propulsión lineal de estator largo, se instala a lo largo de la pista o guías un sistema de devanados multifase para que el campo se mueva a la velocidad de sincronismo; este devanado es alimentado por secciones a través de convertidores de potencia estacionarios. De esta forma el dispositivo móvil será la parte pasiva y es donde tendrá alojados los imanes permanentes. La mayor ventaja de esta topología es que se obtienen velocidades por encima de los 500 Km/h o 300 mi/h [6]. La **Figura 2.10** muestra la topología de estator corto y estator largo.

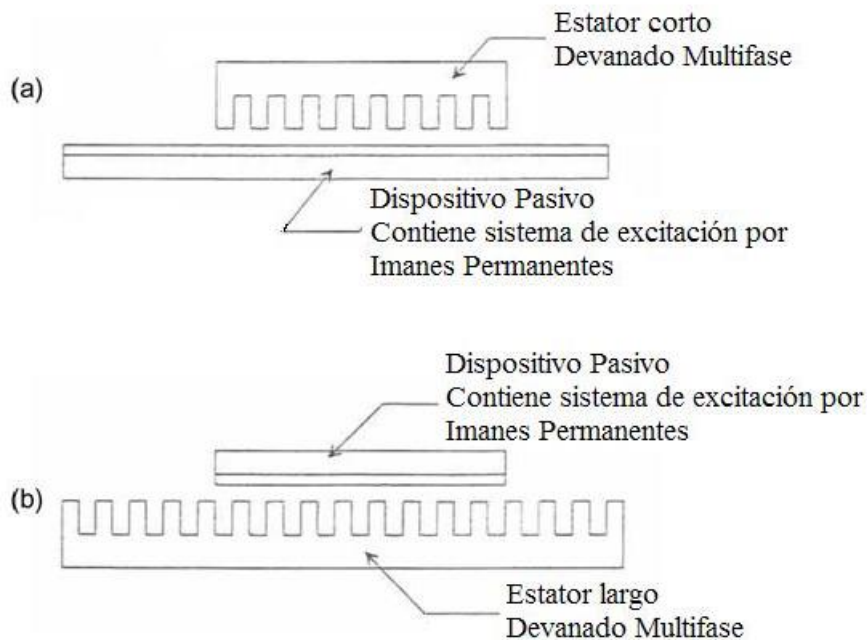


Figura 2.10: Topología del MSLIP, (a) Estator corto; (b) Estator Largo [6].

## b. Monoláteros – Biláteros.

En los MSLIP planos se encuentran topologías con estator monoláteros o bilátero, los monoláteros son la configuración más simple de los motores lineales, contiene el dispositivo primario o parte activa, que es donde se aloja los devanados, principalmente corresponde al estator del motor, y el secundario o zona pasiva, donde se instalan los imanes permanentes. También existen motores planos con la disposición de los imanes

permanentes en configuración conocida como canal en U, consiste en una estructura que aloja hileras de imanes permanentes enfrentados con polaridad alternada y su dispositivo móvil será el que se desplaza a lo largo del canal, por lo general este dispositivo será el que contenga los devanados del motor (ver **Figura 2.11**).

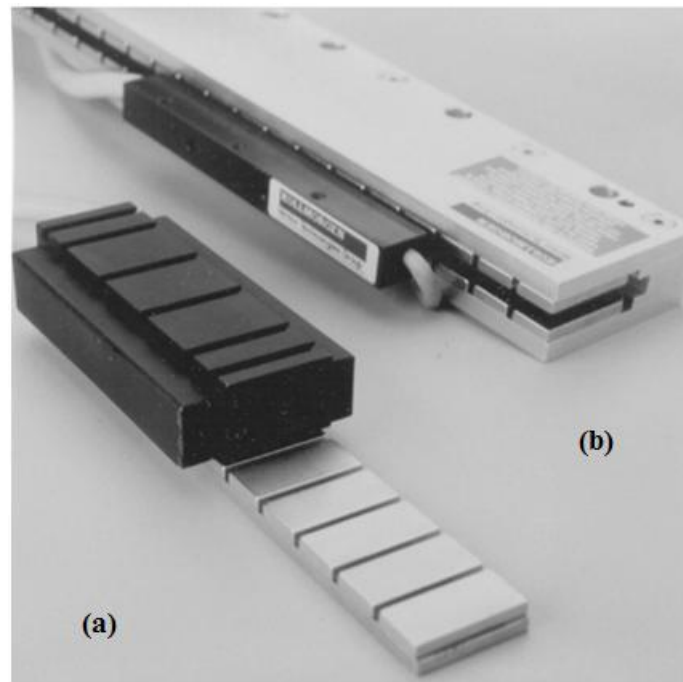


Figura 2.11: MSLIP Topologías Monolátero (a); y Bilátero (b) [1].

### c. Planos – Tubulares.

La topología de motor lineal plano es la descrita y explicada anteriormente como la configuración más simple que existe de los motores lineales.

Un motor tubular no tiene ninguna conexión en los extremos y por tener el secundario concéntrico la fuerza normal será igual a cero; estos motores en su mayoría tienen su sistema de excitación con imanes permanentes (ver **Figura 2.12**).

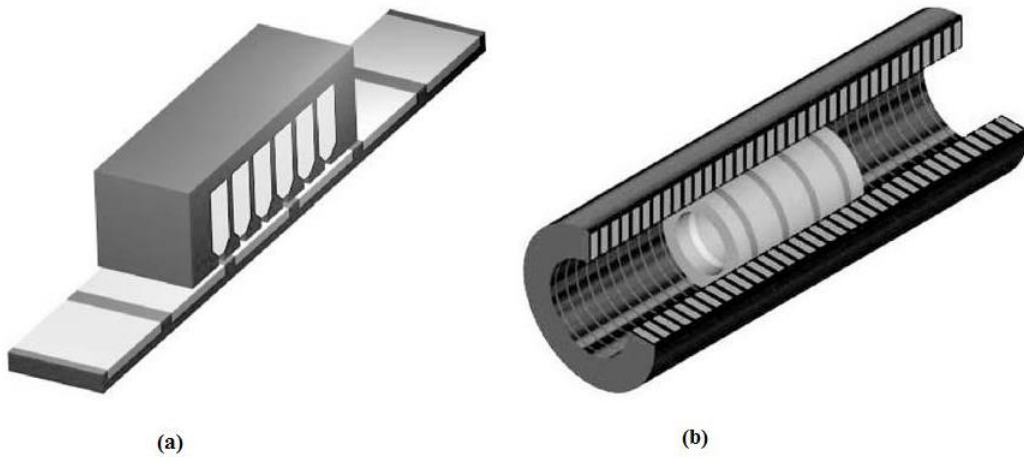


Figura 2.12: MSLIP Plano (a); Tubular (b) [7].

#### d. Flujo longitudinal – Flujo Transversal.

El flujo longitudinal de los MSLIP corresponde a las líneas de flujo que están en paralelo a la dirección del campo magnético móvil (**Figura 2.13 a**). Los motores que presentan las líneas de flujo magnético perpendiculares a la dirección del campo móvil, son los motores de flujo transversal (**Figura 2.13 b**).

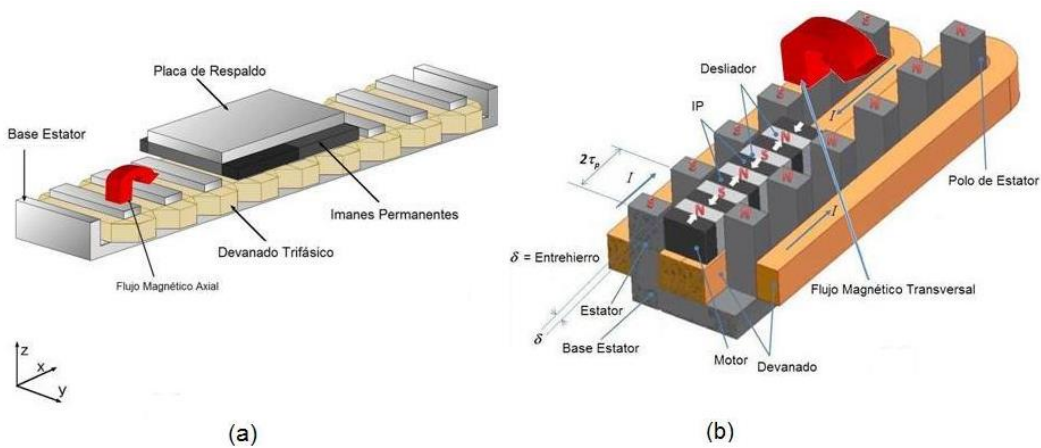


Figura 2.13: MSLIP de flujo longitudinal (a) y flujo transversal (b) [8, 9].

#### e. Con Núcleo Ferromagnético – Sin Núcleo Ferromagnético.

Los motores con núcleo de hierro (*iron-cored* expresión en inglés) son utilizados para alojar el devanado primario, generando un campo magnético más intenso en el

entrehierro del motor por la interacción entre este campo y el campo generado por los imanes permanentes. Los motores de núcleo no magnético (en inglés *ironless*) normalmente llevan el devanado del primario alojado en un núcleo de resina tipo epoxy, que mejora las condiciones de rigidez mecánica, resistencia y buena disipación de calor; su capacidad de producción de fuerza es menor que los motores con núcleo de hierro, pero son motores más ligeros, rápidos y trabajan a más bajas temperaturas [10] .

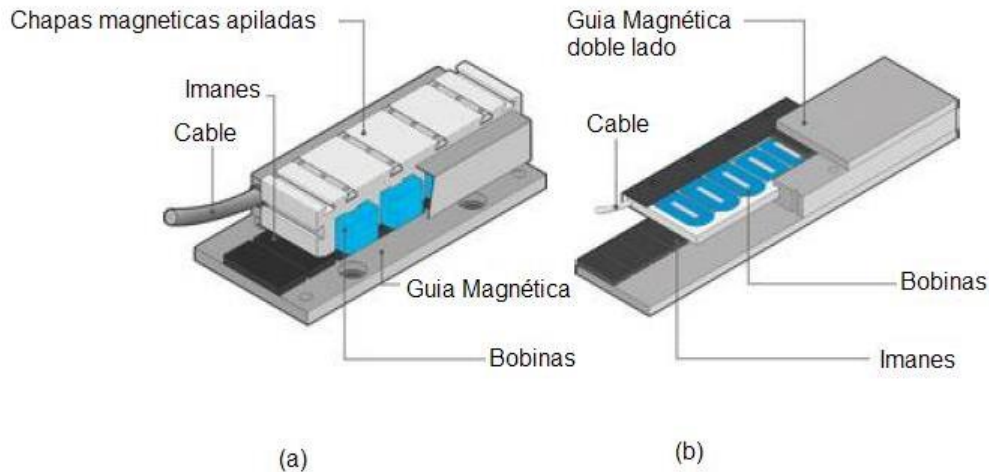


Figura 2.14: Núcleo de MSLIP con hierro (a) y con Resina Epoxy (b) [10].

El MSLIP objeto de estudio en esta tesis es un motor de estator largo (es decir que el estator tiene mayor longitud que el deslizador), con devanado en un solo dispositivo o monolátero, con una línea de imanes enfrentados al devanado de la armadura y separados por un único entrehierro; es un motor plano debido a que el estator y el deslizador se representan como dos elementos paralelos; es de flujo longitudinal, al presentar las líneas de flujo la misma dirección del movimiento descrito por el deslizador; de armadura ranurada, ya que el bobinado se encuentra alojado en las ranuras del núcleo ferromagnético. Los imanes permanentes se dispondrán en configuración Halbach (Ver **Figura 2.15**). A continuación se describe brevemente la configuración Halbach.

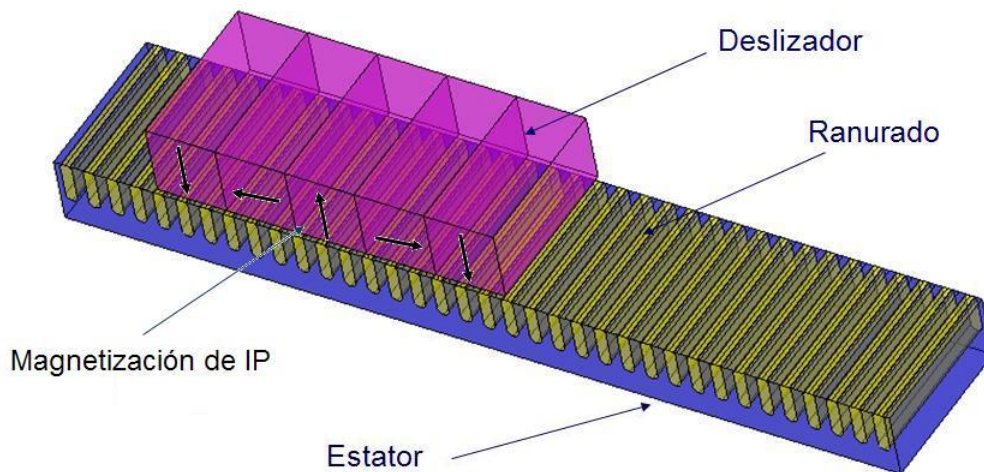


Figura 2.15: MSL con Imanes Permanentes en configuración HALBACH [Elaboración propia].

### 2.2.2 Disposición Halbach.

Una matriz Halbach es una combinación especial de imanes permanentes que están situados uno junto a otro sin entrehierro; son generalmente imanes discretos y magnetizados cada uno en diferente dirección y sentido. El sentido de magnetización suele diferir en noventa grados para los imanes contiguos. Su objetivo es reforzar el campo magnético a un lado de la matriz mientras que se elimina, por interferencia, el campo magnético en el lado opuesto. El efecto fue descrito por Mallison en 1973 como una “curiosidad magnética”, aunque poco después y de forma independiente fue descubierto por Halbach [11, 12], que lo empleó en el acelerador de partículas del Lawrence Livermore National Laboratory. Las matrices Halbach se han empleado en motores lineales, rotativos [13], levitación magnética [14] o frenos por corrientes de Foucault [15].

Una matriz Halbach ideal tiene una densidad de flujo magnético en el lado fuerte, (que varía de forma sinusoidal con la distancia) y campo nulo en el lado débil.

La **Figura 2.16** muestra la distribución de campo magnético de los imanes permanentes del deslizador de un motor lineal síncrono de imanes permanentes en configuración Halbach.



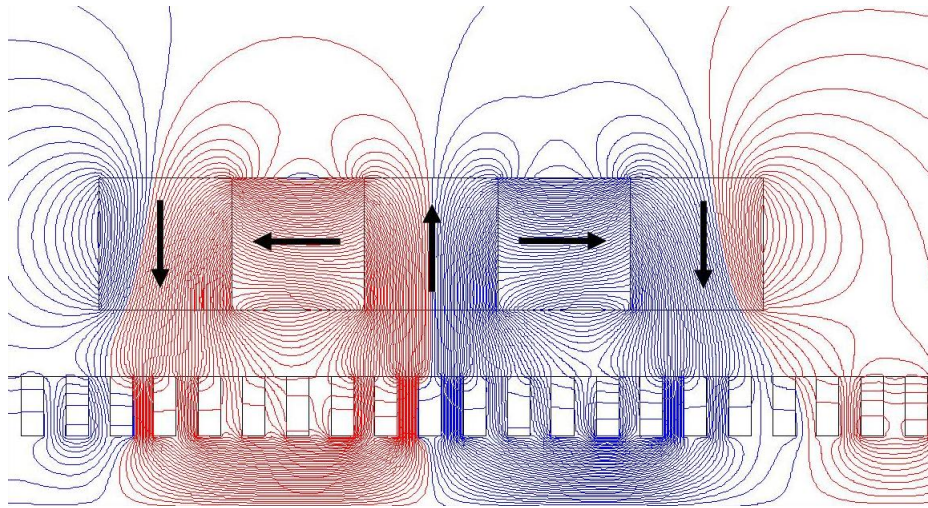


Figura 2.16: Distribución de campo magnético del MSLIP configuración Halbach [Elaboración propia].

En la **Figura 2.17** se muestran las líneas de campo magnético que crean dos fases del inducido; la configuración convencional de los imanes se muestra en la Figura. 2.17(a) y la configuración Halbach en la Figura 2.17 (b). Los imanes del rotor y los conductores del inducido están alineados para producir el empuje máximo.

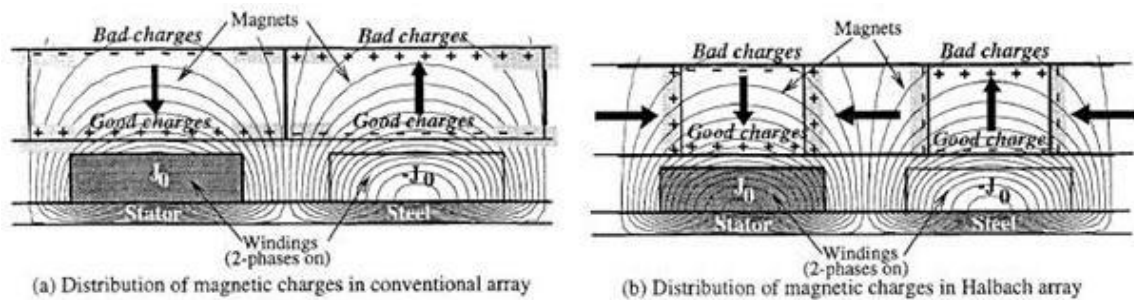


Figura 2.17: Distribución de cargas formadas por dos fases del inducido [16].

Para comparar su funcionamiento, en el trabajo de Ofori [16] se han asociado las cargas magnéticas a la configuración de los imanes: las denominadas “cargas buenas” (ver **Figura 2.17**) interactúan con la componente tangencial del campo magnético creado por los conductores del inducido y producen la fuerza de propulsión. Las cargas marcadas con una sombra en la misma figura no son cargas útiles; se comprueba que el campo magnético que interactúa con las denominadas “cargas malas” es muy débil para un espesor razonable de los imanes [16].

Para comprender las ventajas que esta topología puede ofrecer, se ha de pensar el origen de la fuerza electromagnética no como el producto vectorial de la componente

radial de la densidad de flujo de entrehierro en vacío y la corriente del inducido sino más bien como la componente tangencial del campo magnético producido por los conductores del inducido actuando sobre las cargas magnéticas. La explicación que se podría dar para una máquina con estator ferromagnético sería prácticamente la misma, incrementándose el empuje producido para cualquiera de las dos configuraciones mostradas.

La configuración Halbach en motores rotativos síncronos de imanes permanentes con núcleo no ferromagnético siempre produce mayor par que la configuración de imanes convencional, para el mismo volumen de imanes. Cuando el estator es ferromagnético, la configuración Halbach, produce mayor par a partir de un determinado espesor de los imanes (en relación al paso polar) [16]. Algunos estudios demuestran que con los MSLIP se puede conseguir hasta un 44% más de empuje con la configuración Halbach que con la configuración imanes verticales para el mismo volumen de imanes, reduciéndose además el valor del rizado de la fuerza [17]. En general, cuando el deslizador de imanes no es excesivamente delgado, la configuración Halbach proporciona una mayor amplitud de la onda fundamental de la onda de densidad de flujo en el entrehierro, así como una menor tasa de distorsión armónica.[18].

### **2.3 Fuerzas presentes en los MSLIP.**

Tradicionalmente los motores síncronos trifásicos son motores con excitación electromagnética en continua; la fuerza de empuje tiene dos componentes: uno debido al campo y flujo magnético creado por la corriente continua (componente síncrona) y otra debido al movimiento del campo magnético estatórico que puede ser de reluctancia variable (componentes  $d$  y  $q$  de reluctancia) [19].

En los motores síncronos lineales de imanes permanentes se producen unas fuerzas en el entrehierro que actúan entre el deslizador y el estator; estas fuerzas son las responsables de generar el movimiento relativo o desplazamiento del dispositivo móvil. Las principales fuerzas implicadas en el movimiento son la fuerza de empuje y las fuerzas normales, de atracción y/o repulsión.



Los motores lineales síncronos de imanes permanentes con núcleo ranurado presentan en el entrehierro unas variaciones de energía debidas a la tendencia que tienen los imanes de alinearse en la posición de mínima reluctancia con respecto a los dientes de la armadura, la denominada fuerza de diente (*cogging force* en inglés). Además, la inducción magnética de la excitación en el entrehierro es no sinusoidal, por la geometría del deslizador de imanes. La combinación de los efectos mencionados produce una fuerza de retención o de retención (en inglés se le conoce como “*detent force*”), que se manifiesta en pequeños saltos u ondulaciones [19]; éstas afectan el empuje del MSLIP originando variaciones momentáneas de la velocidad en el motor que especialmente, dificultan el control del mismo, pudiendo producir inestabilidad mecánica y generar ruido.

La importancia de resolver o minimizar los efectos anteriormente mencionados exige la realización de un estudio electromagnético, estático, estructural y vibracional del deslizador, o parte móvil del motor lineal síncrono de imanes permanentes; este estudio define las limitaciones estructurales y mecánicas del prototipo.

Muchos autores han estudiado las fuerzas en motores lineales, comenzando por aquellos que en la década de los 70 estudiaron la levitación magnética; uno de los estudios básicos sobre las fuerzas de empuje y normales en motores síncronos lineales para transporte terrestre en aplicaciones de alta velocidad, fue el publicado por E. Levi en 1973 [20]. En él se centran los principios básicos de la aplicación de los motores síncronos lineales a la levitación. Como conclusión Levi facilita una expresión que relaciona la fuerza de empuje con la fuerza normal en el motor como función de ciertos parámetros de diseño como son el espesor de entrehierro o el paso polar, para una configuración concreta del motor.

Destacar también autores como Boldea y Nasar [21] que en 1975 publican un estudio sobre las fuerzas que caracterizan el comportamiento de un motor de reluctancia lineal con secundario segmentado para evaluar su adecuación a sistemas de transporte terrestre. En la **Figura 2.18** observamos una vista longitudinal del mencionado motor.

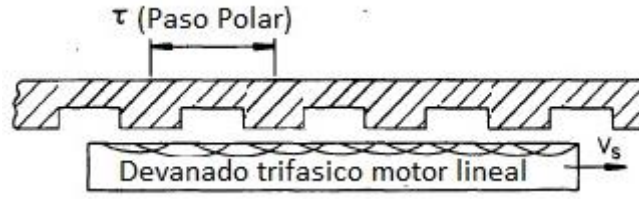


Figura 2.18: Motor de reluctancia lineal con secundario segmentado [21].

A continuación se desarrolla el comportamiento de este motor trifásico, como ejemplo explicativo; el cálculo de las expresiones de la fuerza de empuje y la fuerza normal en este motor se realiza con base al análisis convencional de máquinas síncronas de polos salientes, y a partir de las siguientes hipótesis simplificativas:

- La permeabilidad del material ferromagnético del secundario se considera infinita.
- No se consideran los armónicos espaciales ni temporales, salvo el fundamental; se desprecian pues las corrientes de Foucault en el secundario que estarían presentes en régimen permanente.
- Se desprecian flujos de dispersión longitudinal y transversal.
- Se desprecian los efectos de borde.

Las expresiones de la fuerza normal y de empuje se calculan pues para un motor de una geometría muy concreta y bajo unos supuestos muy simplificados.

La componente  $x$  refleja la fuerza de empuje;  $F_x$  se relaciona con la potencia mecánica desarrollada mediante la expresión:

$$F_x = \pi P_m / \tau \omega \quad (2.1)$$

Siendo la potencia mecánica:

$$P_m = 3VI \cos \phi - 3(I_d^2 + I_q^2)R \quad (2.2)$$

Así, el empuje resulta:

$$F_x = \frac{3\pi V^2 (X_d - X_q)}{2\tau\omega (X_d X_q + R^2)^2} \{ (X_d X_q - R^2) \sin 2\delta + R(X_d + X_q) \cos 2\delta - R(X_d - X_q) \} \quad (2.3)$$

$F_n$ , la fuerza normal al movimiento, se determina a partir de  $\omega_m$ , la energía magnética almacenada en el entrehierro:

$$\omega_m = \frac{3}{\omega} (X_{dm} I_d^2 + X_{qm} I_q^2) \quad (2.4)$$

$$|F_n| = \left( \frac{\partial W_m}{\partial g_1} \right)_{I,\delta}$$

$$|F_n| = \frac{3I^2}{\omega} \frac{\partial}{\partial g_1} [X_{dm} \{ (X_{qm} + X_\sigma) \cos \delta - R \sin \delta \}] \quad (2.5)$$

$$\frac{X_{qm} [(X_{dm} + X_\sigma) \sin \delta + R \cos \delta]^2}{\{ (X_{dm} + X_\sigma) \sin \delta + R \cos \delta \}^2 + \{ (X_{qm} + X_\sigma) \cos \delta - R \sin \delta \}^2}$$

La nomenclatura que emplean en sus expresiones parte de la empleada en el análisis convencional de máquinas síncronas y ha sido usada posteriormente en gran parte de la literatura existente sobre motores lineales:

$g_1$  = Espesor de entrehierro, m

$I$  = Corriente de fase del primario, A

$R$  = Resistencia del primario por fase,  $\Omega$

$X_d$  = Reactancia en eje d del primario por fase,  $\Omega$

$X_{dm}$  = Reactancia de magnetización en eje d,  $\Omega$

$X_q$  = Reactancia en eje q del primario por fase,  $\Omega$

$X_{qm}$  = Reactancia de magnetización en eje q,  $\Omega$

$X_\sigma$  = Reactancia de dispersión del primario,  $\Omega$

$V$  = Fasor de la esfuerzos de fase en los terminales, V

$\delta$  = Ángulo de carga, rad

$\eta$  = Eficiencia

$\tau$  = Paso polar, m

$f_p$  = Factor de potencia

$\omega = 2\pi f$  = Frecuencia angular del primario, rad/s

Resulta interesante observar el resultado de esta formulación aplicada a un ejemplo concreto de transporte a alta velocidad [20]; en este estudio Levi parte de un motor lineal de las siguientes características:  $P_n = 4000\text{kW}$ ,  $V = 7000\text{V}$ ,  $f = 100\text{Hz}$ ,  $2p = 12$ ,  $v_s = 90\text{ m/s}$ . Se emplea para mover un vehículo de 25 ton. El empuje requerido es aprox. de 44 kN. Para valores de diseño de espesor de chapa primaria 0,25 m, entrehierro  $de = 0,02\text{--}0,05\text{m}$  y a plena carga (se supone que trabaja con un ángulo de carga  $= \pi/6$ ), se obtienen las fuerzas representadas en la **Figura 2.19**; fuerzas normales positivas implican fuerzas de atracción entre primario y secundario.

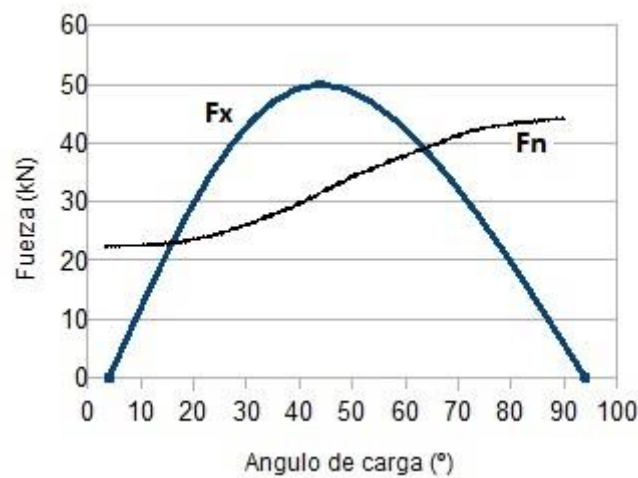


Figura 2.19: Representación de las fuerzas de un motor lineal aplicado a sistema de transporte [20].

Es de resaltar la gran dependencia que tienen la intensidad de la fuerza de empuje y de la fuerza de atracción o repulsión de la carga, las características y el diseño del motor. Entre estas características, como veremos, destacan la configuración de los imanes permanentes, la longitud de entrehierro, el tipo de devanado y el material del núcleo del estator. El estudiar cómo afectan estas características a las fuerzas presentes en los MSLIP es de vital importancia para su correcto diseño y para la optimización de su dinámica.

La técnica del modelado por métodos numéricos se emplea para estudiar tanto las fuerzas normales de los MSLIPs como la fuerza de empuje o la fuerza de diente. El método numérico más empleado en el modelado de MSLIP es el que emplea los elementos finitos en 2D (MEF-2D). Este es el caso de los estudios realizados por autores como Remy G. et al [22-25] que calculan las fuerzas electromagnéticas utilizando dos enfoques del MEF; uno es el método de trabajo virtual (VWM siglas en inglés) que se basa en la transformación de la energía magnética en energía mecánica; el otro enfoque es mediante el empleo del Tensor de Esfuerzos de Maxwell (MST en inglés The Maxwell Stress Tensor), que permite calcular la fuerza utilizando una integración de superficie sobre un determinado dominio [26]. Los mismos autores proponen utilizar el MEF para estudiar las fuerzas de diente y las fuerzas de efecto de borde que componen las fuerzas de retención en un MSLIP; el estudio lo realizan para un motor sin carga.

A continuación se resumen algunos de los estudios realizados en los últimos años en relación a las fuerzas que aparecen en los motores lineales, distinguiendo entre fuerzas normales al desplazamiento del motor y fuerzas de empuje del mismo.

### **2.3.1.1 Fuerzas normales al desplazamiento.**

Como se acaba de describir, existe una relación entre la fuerza de empuje y la fuerza normal al movimiento del motor que depende fundamentalmente del ángulo de carga. Para controlar la fuerza normal, habitualmente se desacopla de la de empuje; se ha de medir el ángulo de fuerza midiendo el desplazamiento entre el campo fundamental establecido por los imanes permanentes del MSL y el generado por el devanado estático [27].

Centrémonos en el estudio de las fuerzas normales al movimiento para una topología concreta del MSLIP: motor lineal de estator largo y de imanes en el deslizador, topología que, como se justificará más adelante (capítulo 5), fue la elegida para el diseño del motor de propulsión de esta tesis. El estudio lo presenta Yoshida [28], aplicado a un pequeño vehículo con cuatro ruedas (pesa poco más de 41 kg), que en su propulsión se le aplica el efecto de reducción de masa, es decir un valor de fuerza

normal repulsivo que compense el peso y carga del vehículo. La **Figura 2.20** muestra la sección longitudinal del MSLIP objeto de estudio.

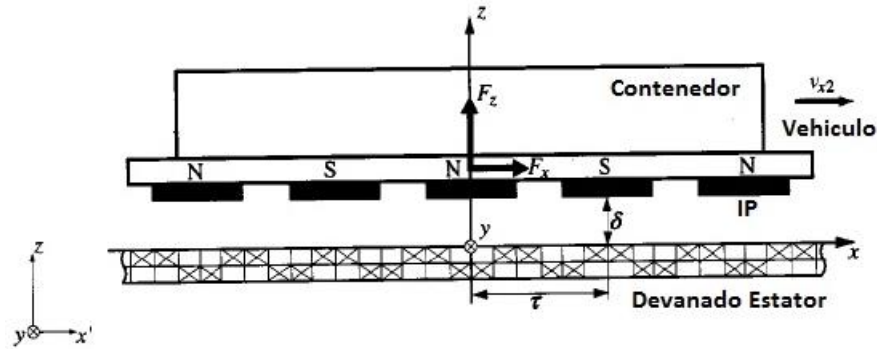


Figura 2.20: Sección longitudinal del MSLIP [28].

El estator, está configurado horizontalmente en tres fases y el deslizador se compone de una serie de imanes permanentes con polaridad alternada; las bobinas del estator están diseñadas con núcleo de aire, por lo que el MSLIP puede operar en modo repulsivo. Entonces, las fuerzas magnéticas producidas en el MSLIP se pueden descomponer en tres: fuerza de empuje, fuerza normal de elevación y las fuerzas laterales en un sistema de coordenadas tridimensional  $(x, y, z)$ . Debido a que el vehículo está guiado para funcionar linealmente sobre los raíles no es necesario tener en cuenta el efecto de la fuerza lateral en el vehículo. Se supone que el vehículo se mueve a una velocidad síncrona en régimen estacionario.

En la **Figura 2.21** se muestra en línea sólida la onda fundamental del campo producido por el estator y en líneas de puntos la de la FMM producida por los imanes; el sistema de referencia está ligado al deslizador.

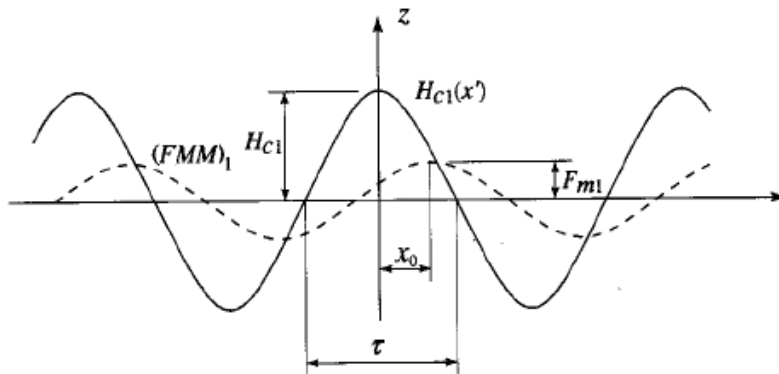


Figura 2.21: Onda fundamental de campo producido por el estator y FMM producida por los IP [28].

Cuando la onda de FMM está retrasada respecto a la del estator (un determinado ángulo de carga mecánica  $x_0$ ) se pueden expresar las fuerzas de empuje y de elevación mediante las siguientes fórmulas analíticas:

$$F_x = k_{F0}(g_1)I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x_0\right) \quad (2.6)$$

$$F_z = -k_{zs}(g_1)I_1^2 - k_{zMS}(g_1)I_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x_0\right) \quad (2.7)$$

Dónde:  $k_{F0}, k_{zs}, k_{zMS}$ , son los coeficientes de las fuerzas de empuje y elevación sobre las que conciernen a la estructura del motor [28].

$I_1$ : Corriente eficaz de estator

$\tau$ : Paso polar

$g_1$ : Longitud de entrehierro

$x_0$ : Ángulo de carga mecánica

Estas expresiones se obtienen calculando el campo con el potencial vector magnético y el método de la matriz de transferencia [29]. Las fuerzas de empuje y de elevación son función de la corriente de estator y del ángulo de carga mecánica.

Resulta relevante precisar que una vez definida la corriente que facilite el empuje del motor seleccionado, es el ángulo de carga el que determina el signo de la fuerza normal,  $F_z$ . Para la expresión mostrada, un valor de  $F_z$  negativo implica fuerza normal de elevación o levitación. El primer término de la expresión de  $F_z$  representa la fuerza de atracción magnética entre el estator y deslizador y es muy pequeño debido a que la FMM de estator es mucho menor que la de los imanes; el segundo término de la expresión de  $F_z$  es la componente vertical de la fuerza magnética que se produce entre los imanes y los devanados del estator.

Existen diversos métodos de control que permiten desacoplar  $F_x$  y  $F_z$  para controlarlas de forma independiente. Para una aplicación de levitación como la

presentada en [28] habría por tanto que calcular los límites del ángulo de carga mecánica  $x_0$  para los que la  $F_z$  es repulsiva, es decir la fuerza de elevación positiva. La **Figura 2.22** muestra las relaciones entre las fuerzas de empuje y elevación en función del ángulo de carga mecánica. Este ángulo  $x_0$  debe estar dentro de un rango de  $\tau/2$  a  $\tau$  y  $-\tau/2$  a  $-\tau$ .

No se puede suponer de partida en el estudio que el entrehierro es constante, ya que el vehículo funciona con reducción de masa pero con apoyo de ruedas, lo que genera ciertas variaciones en la distancia del deslizador y el carril-guía que conducen inevitablemente a variaciones del espesor del entrehierro y a vibraciones irregulares asociadas a la elasticidad del vehículo. Sin embargo y habitualmente, para la simplificación de este problema, se supone que la longitud del entrehierro es constante.

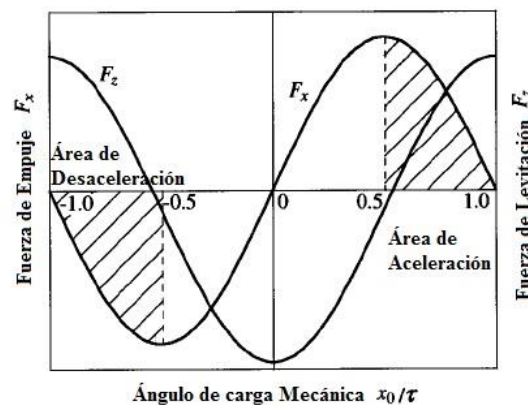


Figura 2.22: Fuerzas de empuje y elevación en función del ángulo de carga mecánica.

Existen multitud de investigaciones publicadas en los últimos años en el campo de los MSLIPs que tratan las fuerzas normales al desplazamiento (o fuerzas de levitación en el caso de ser de repulsión); entre ellos destacan los siguientes:

- Kang G.-H. [30]. Han investigado el efecto de la fuerza lateral en el MSLIP para la orientación en la etapa de levitación magnética, con el fin de analizar no solo el efecto de dispersión de campo en el MSLIP, sino también la simetría lateral del dispositivo móvil, Por otra parte, la fuerza lateral se genera por el flujo de dispersión lateral debido al ancho de longitud finita; en este motor, la fuerza de atracción ejerce una resistencia al movimiento del MSLIP, sin embargo la fuerza de atracción puede utilizarse como fuerza de levitación mediante el control de la amplitud de la corriente y



su ángulo de fase en etapa de levitación magnética, siendo esto útil para eliminar el carril o raíl guía. En el caso de asimetría entre el dispositivo fijo y el móvil, la fuerza de empuje y la fuerza normal se reducen, pero la fuerza lateral se incrementa y actúa como fuerza de recuperación del motor, este estudio es aplicado a los motores síncronos lineales de levitación magnética pero no hace ningún énfasis en los niveles de vibración que produce el motor.

- Thornton et al [31-33] en sus artículos describen el Sistema M3 del Proyecto Urbano Maglev. El diseño se basa en el uso de imanes permanentes para Suspensión y guía electromagnética con un motor síncrono lineal para la propulsión. El Sistema M3 Maglev fue desarrollado originalmente como parte del Proyecto Urban Maglev de EE.UU. y se centra ahora en la demostración de la operación en un carril-guía existente en Old Dominion University en Norfolk, Virginia. Los imanes permanentes proporcionan la mayor parte de la suspensión y las fuerzas de orientación. Tiene bobinas enrolladas alrededor de los imanes, se excitan con el fin de estabilizar la suspensión y controlar el entrehierro magnético, además de proporcionar amortiguación para reducir buena parte de la energía vibracional producida con el movimiento lateral. El mismo campo magnético que produce la suspensión y las fuerzas de orientación también interactúa con la corriente en el carril-guía para producir la fuerza de propulsión.

- Jung en 1999 [34] analiza las fuerzas de empuje, fuerza de diente y fuerza normal de dos tipos de motores síncronos lineales de imanes permanentes, uno de primario corto y el segundo de secundario corto, utilizando el método de elementos finitos (MEF). En este artículo se estudian las características de acuerdo al ancho de los imanes y el efecto de la forma del núcleo primario para la reducción de la fuerza de retención. El movimiento del motor y la anchura de IP son automáticamente variados en el análisis de EF. Para cambiar el ancho de los imanes se utiliza el método de desplazamiento de nodo.

- Manfredi Maggiore and Rafael Becerril en [35] estudian el problema de controlar la posición de una placa en estado de levitación utilizando motores lineales en un espacio tridimensional; en este artículo se presenta un breve resumen de la derivación de las expresiones de las fuerzas normales y longitudinales en un MSLIP. La

superposición de los imanes permanentes y las densidades de devanado de campo se obtiene la densidad de campo resultante en el entrehierro. Después de la incorporación de la permeabilidad relativa, la densidad de campo resultante conduce a expresiones de las fuerzas en la máquina. Su desarrollo incorpora la variable de longitud en el entrehierro pero no profundiza en el estudio de las ondulaciones que provoca el sistema a la estructura mecánica.

- En otro estudio [36], Xiong y Nasar realizan un análisis de un modelo de MSLIPs utilizando el concepto de carga magnética; se obtienen las soluciones analíticas para las distribuciones de fuerza en dos y tres dimensiones producidas por los imanes permanentes, pero no tiene en cuenta el efecto de las ranuras del estator.

- F. Profumo, A. Tenconi, y G. Gianolio [37, 38] proponen un MSLIP bilátero con doble inductor largo y un inducido corto sin hierro; esta topología permite tener una alta relación de fuerza de empuje y fuerza normal ( $F_e/F_n$ ) y una baja rigidez normal, el valor de la fuerza normal  $F_n$  está relacionado sólo con las líneas de flujo del campo magnético que unen sólo uno de los dos inductores. Por estas razones, la relación  $F_e/F_n$  depende principalmente de la geometría del motor en el plano normal a la dirección de movimiento.

- En el trabajo desarrollado por You Guang Guo et al [39], se presenta el diseño y análisis de un MSLIP para la conducción de un vehículo-prototipo a pequeña escala con la aplicación de “Superconductores de Alta Temperatura” (HTS siglas en inglés) utilizados para la fuerza de levitación magnética; su estudio se centra en la obtención de una fuerza de empuje máxima producida por una densidad de corriente muy alta en instantes cortos de tiempo a través de los superconductores.

- El diseño y las simulaciones realizados por Patterson D. et al [40] sobre un sistema de lanzadera electromagnética de aviones (EMALS siglas en inglés), utiliza un motor síncrono de imanes permanentes de estator largo e imanes permanentes en disposición de polos opuestos. La arquitectura del modelo consta de dos partes, el modelo del devanado del estator y el modelo de la lanzadera. Se aplica el teorema de superposición en el modelo de lanzadera para sumar la fuerza generada por cada sección y a continuación para resolver las ecuaciones mecánicas para la velocidad y la posición.

- En 2005 Quesada J. R. [41] muestra que las estructuras que utilizan configuración Halbach en asociación con una estrategia poco convencional del bobinado y una lanzadera tipo pala, pueden producir soluciones muy interesantes para construir una máquina síncrona de imanes permanentes EMALS. El rendimiento de estas máquinas se calcula utilizando un código de diferencia finita bidimensional. El estudio también muestra que el uso de devanados concentrados con paso reducido puede mejorar el comportamiento de este tipo de sistema en términos de control del empuje y control de pérdidas por efecto Joule.

- En el estudio realizado para el MSL compuesto por bobinas sin núcleo de hierro y una composición en Halbach de los imanes permanentes [42], se propone un algoritmo para calcular el campo magnético de imanes con dirección de magnetización arbitraria; utiliza expresiones muy similares a las técnicas de transformación para el campo magnético y la fuerza lineal de la matriz Halbach. Esta técnica fue deducida por Denavit-Hartenberg (DH) y aplicada en [42].

- Zhang Qi [43], establece la fórmula de calcular el campo magnético producido por un imán permanente la cual es deducida a partir del modelo equivalente de corriente y el campo magnético producido por imanes permanentes en configuración Halbach; realiza el diseño de un motor síncrono lineal con imanes permanentes en configuración Halbach y bobinas sin núcleo ferromagnético en el estator [43].

- Un estudio realizado con calculo numérico por medio del método de elementos finitos MEF y por el método analítico MA, en [44] presenta las características y graficas de las fuerzas generadas por diferentes tipos de imanes permanentes, comenzando su análisis con la configuración Halbach estándar; se encuentra una relación del ancho de los imanes permanentes, espesor, numero de segmentos magnetizados por polo y forma de los IP que reduce el rizado en el empuje.

### **2.3.1.2 Fuerzas de Empuje.**

La fuerza de empuje en motores lineales surge de la tendencia del campo magnético del deslizador a alinearse con el campo magnético creado por el devanado de excitación

para intentar alcanzar el estado de mínima energía. Debido a ello, se creará un empuje en la dirección de movimiento lo que permitirá al deslizador o parte móvil desplazarse linealmente.

Uno de los problemas que presentan los MSLIP es el rizado asociado a la fuerza de empuje, que se debe básicamente a tres causas: a las fuerzas que surgen de la tendencia en las piezas del motor de buscar las posiciones de mínima reluctancia, a la forma de los imanes que no produce una onda de FMM senoidal pura y a los armónicos de la corriente de alimentación del estator. En las aplicaciones de transporte es de vital importancia que el movimiento sea suave; por ello dedicaremos un apartado de la tesis (Capítulo 4) al estudio del rizado en la fuerza de empuje y otro (Capítulo 5) a las soluciones que existen para minimizarlo.

Los estudios existentes sobre estas fuerzas se centran fundamentalmente en los siguientes aspectos de interés para la tesis:

- Incremento de la fuerza de empuje.
- Disminución del rizado de la fuerza de empuje.

A continuación se resume el estado del arte en relación a los tres aspectos fundamentales en relación a la fuerza de empuje de un motor lineal.

#### **2.3.1.2.1 Incremento de la fuerza de empuje.**

Las variaciones en la geometría y diseño del estator de un MSLIP afectan a su empuje y por tanto se han de estudiar en vistas a la optimización y mejora del rendimiento. Tal es el caso del MSLIP presentado en [45]. El motor tiene pocos dientes, paso corto, estructura simple, así como un buen rendimiento. La fuerza de empuje es analizada en estado estático. Esta fuerza se calcula en diferentes posiciones del deslizador y para distintos valores de corriente de inducido. Este motor, presenta alta fuerza de empuje con poco rizado en relación a su masa y volumen.

Hay formas de aumentar el empuje de un MSLIP modificando la geometría de los imanes permanentes; por ejemplo en [46] describen el empuje y la distribución de flujo en el entre hierro de un MSLIP de 2 polos en configuración Halbach aplicando un método de la ecuación integral de frontera 3-D variando el alto y ancho de los imanes permanentes.

Estudios recientes emplean el método de “Separación de Variables” para obtener analíticamente en términos de potencial escalar magnético la distribución de campo magnético. Con esta base analítica se obtienen expresiones y se realizan pruebas de flujo de acoplamiento, fuerza contra-electromotriz y fuerza de empuje, optimizando el diseño con parámetros principales tales como distancia del entrehierro, numero de polos, espesor de los imanes permanentes, espesor de las bobinas, para maximizar la fuerza de empuje de un motor síncrono de superficie plana de imanes permanentes [34, 47, 48] .

El autor Do-Kwan Hong y su grupo de investigación presenta un diseño optimizado de motor lineal de imanes permanente y flujo transversal (PM-TFLM siglas en inglés) para reducir el peso de la maquina considerando las restricciones del empuje y la fuerza de diente utilizando el método de “Respuesta de Superficie (RSM)” [48] . Otras técnicas que modifican la geometría y el diseño de los MSLIP emplean el método de la inclinación de los imanes permanentes o el de seccionar los imanes para reducir la fuerza de diente y aumentar la fuerza de empuje [49].

#### **2.3.1.2.2 Disminución del rizado de la fuerza de empuje.**

El rizado de la fuerza de empuje es perjudicial para el funcionamiento del MSLIP, ya que produce variaciones en la velocidad del deslizador, dificultad para predecir la posición del mismo y por tanto genera más complicaciones en el proceso de control del motor. Estas vibraciones provocan inestabilidad mecánica, además del ruido que se genera en el motor.

### 2.3.1.3 Clasificación de las fuerzas que producen el rizado en una fuerza de empuje.

Las fuerzas que producen rizado en el empuje del MSLIP se pueden clasificar en:

1. **Fuerzas de diente.** En inglés se le conoce como “cogging force” y es debida a la presencia de ranuras en la armadura, que en el caso de los MSLIPs normalmente son mucho más abiertas que en los motores rotativos. Específicamente la fuerza de diente se produce por la interacción de los imanes permanentes y la estructura de material magnético de la armadura, es así como los bordes de los imanes de la excitación tratan de alinearse con los bordes de los dientes de la armadura, generando así una fuerza que es llamada fuerza de diente la cual tiene componentes perpendicular y longitudinal. En los ML suele denominarse fuerza de retención.

2. **Fuerzas debidas a la no senoidalidad de la fem en el entrehierro.** La fem en el entrehierro es no es una onda senoidal pura, debido en gran parte por la forma geométrica de los imanes permanentes que generalmente son rectangulares, (las fuerzas por armónicos en el empuje síncrono). Para reducir el contenido de armónicos en la forma de onda de la densidad de flujo en el entrehierro, se puede variar la forma geométrica de los imanes permanentes o utilizar otras técnicas como el desplazamiento de los imanes.

3. **Fuerzas por efecto de borde.** Se deben a la longitud finita de los núcleos magnéticos del estator y del deslizador, los cuales introducen efectos de borde en la distribución del campo magnético. Los motores lineales por su naturaleza, contienen un circuito magnético con extremos y longitud finita, es decir el circuito magnético no es continuo tanto en el deslizador como en la pista estática o estator. Debido a esto en los extremos del circuito magnético aparecen unas asimetrías del flujo que difieren de las que se muestran en la parte central del motor, originando el efecto de finales de circuito o efecto de borde del motor lineal; este efecto de borde produce deterioramiento en el empuje del motor y un comportamiento dinámico no deseado. Sin embargo, en los casos donde el deslizador tiene una longitud muy inferior a la del estator, el efecto de borde

sobre el rizado no es muy significativo, por lo cual no se tratará el tema en este trabajo de tesis.

**4. Armónicos de la corriente.** La tensión de alimentación estatórica habitualmente proviene de un convertidor que ajusta la amplitud y la frecuencia de la misma, lo que implica una no senoidalidad de la tensión y corriente de estator.

Existen una gran variedad de estudios donde se han aplicado técnicas y métodos para reducir las fuerzas nocivas como es la fuerza de diente o “*cogging force*” en inglés, para el mejorar el funcionamiento y control de un motor lineal, se plantean muchas formas y técnicas para lograr la reducción de la fuerza de diente y mejorar el empuje. Existen técnicas centradas en el diseño del motor, técnicas basadas en el control, y otras que combinan ambas [50]. Dentro del apartado 2.4 se resumen las técnicas de control más interesantes para nuestra aplicación, fundamentalmente centradas en el diseño del motor. Se ha de considerar cómo afecta la técnica que se emplee para reducir el rizado del empuje a la magnitud del mismo.

Debido a la similitud existente entre el efecto que presenta la fuerza de diente en un motor rotativo y en un MSLIP, las investigaciones realizadas aplican métodos y técnicas muy parecidas para reducir el rizado (del par del motor rotativo o del empuje del motor lineal) [51, 52].

## **2.4 Diseño del MSLIP.**

El estudio y diseño de un MSLIP debe tener en consideración dos aspectos principales que dependen del tipo de máquina que se desea construir. Por un lado se debe tener claro la teoría electromagnética para realizar el cálculo de la distribución de campo magnético en toda el área activa o geometría del motor. Este cálculo permite optimizar los parámetros geométricos y dimensionales de la maquina conociendo las zonas que presentan una densidad de campo magnético mayor o más concentrado con el fin de evitar saturación magnética, flujos de dispersión, zonas con incremento de temperatura, magnitud de la fuerzas de empuje y fuerzas normales, y demás parámetros que se deben controlar para un diseño óptimo del MSLIP.

Herramientas utilizadas en el estudio y diseño de este MSLIP son, entre las más frecuentes, las que utilizan métodos analíticos o método de elementos finitos, partiendo siempre de las ecuaciones diferenciales de Maxwell.

Uno de los métodos utilizados para analizar el comportamiento dinámico de un MSLIP es por medio del circuito eléctrico equivalente del motor; mediante la adaptación del modelo *Parámetro Global no lineal* del circuito magnético denominado “Lumped Parameter Model” se representa la dinámica del motor y se predice el rendimiento electromagnético del flujo variable en la máquina de imanes permanentes [53-56].

A lo largo de los años se han realizado diversos análisis de las diversas técnicas de minimización de la fuerza de retención aplicada a MSLIP de estator largo.

Seok-Myeong [57] optimiza el diseño de un MSLIP con rotor corto atendiendo a la variación del ancho de los imanes e inclinación de estos.

En [58] Zhang Ying propone seccionarlos en vez de inclinarlos por resultar más económico.

En [59] Lim emplea la herramienta de Análisis por Elementos Finitos para calcular la fuerza de retención y empuje considerando factores estructurales y factores de no linealidad. Además, se propone el empleo de la técnica de movimiento nodo del modelo para aumentar la eficiencia de modelado de Elementos Finitos con respecto a diversos cambios en su geometría, como son la forma de las ranuras o el ancho y posición de los imanes.

En [60] In-Soung Jung mejora el diseño mediante la inclinación de los imanes y se optimiza el diseño para reducir la fuerza de retención según el valor del ancho de los imanes en relación con el paso de ranura para un motor similar al propuesto en la tesis, de secundario corto (deslizador de imanes). También indica que con el incremento del espesor de entrehierro, la inclinación de los imanes que consigue reducir la fuerza de retención decrece.



Ofori, en [16] compara la capacidad de producción de par según disposición Halbach y las disposiciones más convencionales con imanes en el rotor, sobre un estator no ranurado. El volumen de los imanes, así como la excitación de la corriente del estator es el mismo para cada estudio. Se encuentra que en máquinas con un rotor permeable, la disposición convencional produce un par mayor solo hasta un determinado espesor del imán después del cual la disposición Halbach es mejor; para máquinas sin un soporte de rotor permeable, sin embargo, la disposición Halbach siempre produce un par mayor.

El estudio mostrado en [61] por Nekoubin se centra en el motor de inducción lineal doble. Los resultados de la simulación dinámica muestran conclusiones evidentes: al aumentar el número de polos, se reducen los efectos de las fuerzas de borde extremas y se incrementa el empuje, pero a costa de la reducción de la eficiencia del motor. Por lo tanto, concluye, hay que buscar un equilibrio entre el empuje y la eficiencia al aumentar el número de polos.

También cabe destacar el trabajo de Yaow-Ming Chen, que en [62] compara diferentes modelos de MSLIPs en función de la posición de los imanes, y estudia el efecto del número y disposición de los imanes en la magnitud de la fuerza de empuje del motor. Sus conclusiones varían en función de la importancia que para la aplicación tenga el rizado en la fuerza; si éste no es importante, o bien se puede minimizar con algoritmos de control, recomienda, para una altura y anchura de los imanes fija y para un diseño concreto, un número concreto de imanes (12 en su caso), una determinada separación (2 mm) y una disposición superficial de los imanes en el motor.

En [63] el estudio se completa con el análisis de la influencia de otros parámetros como la longitud de entrehierro.

## **2.5 Control de MSLIP.**

El problema principal en la mejora del seguimiento de las consignas de control de los MSLIPS es la presencia del rizado en la fuerza de empuje, causada en parte por la irregularidad del campo magnético de los imanes y la calidad de la señal de alimentación estática. Mediante un adecuado sistema de control se puede alimentar al

motor lineal minimizando el rizado, de modo que la fuerza de retención sea mínima para el empuje requerido.

Los métodos de control empleados son muy diversos [64-68] y dependen fundamentalmente de la aplicación que se le vaya a dar al motor. La estrategia de control básica más empleada en el caso de los MSLIPs es la de Control Orientado a Flujo de Rotor directo (**Figura 2.23**), muy similar al empleado en motores síncronos rotativos.

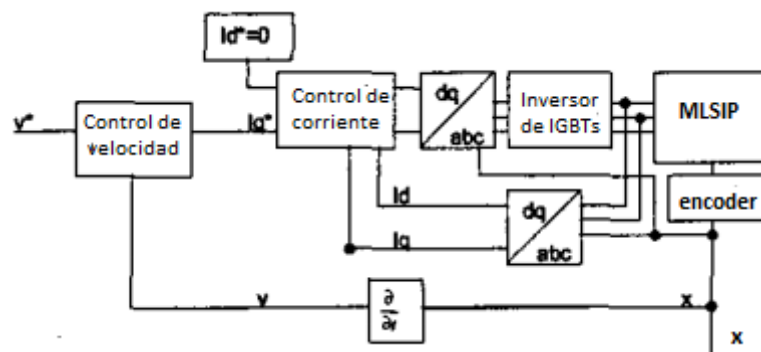


Figura 2.23: Diagrama de bloques del control FOC del MSLIPs

En [50] se emplea éste método y se añade un compensador de la fuerza de retención a partir de un modelo matemático de la misma; proponen dos métodos para reducir la fuerza de retención: la optimización del diseño y construcción o el control con un compensador (o ambos simultáneamente). Su conclusión es que cuanto mejor esté diseñado el motor con el objetivo de reducir ésta fuerza, más complejo resulta el modelo matemático y menos efectivo es el compensador.

El control del motor no es el objetivo de la presente tesis, por lo que no profundizaremos más en este apartado.

## Referencias

- [1] J. Gieras F., Z. Piech J. and B. Tomczuk Z. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems* (Second Edition ed.) 201120.
- [2] S. A. Nasar and I. Boldea, *Linear Electric Motors*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [3] D. G. Martínez, ""Optimizacion del comportamiento dinamico de Motores Lineales Sincronos de Imanes Permanentes"." pp. 14-15, junio 2005.
- [4] R. H. Engelmann and W. H. Middendorf, *Handbook of Electric Motors*. Board, 1995.
- [5] L. Massagues Vidal. *Aportaciones Al Estudio De Los Motores De Inducción Magnetohidrodinámica* 2001.
- [6] R. Hellinger and P. Mnich. Linear motor-powered transportation: History, present status, and future outlook. *Proceedings of the IEEE 97(11)*, pp. 1892-1900. 2009. . DOI: 10.1109/JPROC.2009.2030249.
- [7] N. Bianchi, S. Bolognani and A. D. F. Cappello. Reduction of cogging force in PM linear motors by pole-shifting. *Electric Power Applications, IEE Proceedings - 152(3)*, pp. 703-709. 2005.
- [8] A. Y. El-Ibiary, H. M. Hasanien and M. Badr. Speed control of permanent magnet transverse flux linear motor using artificial neural network controller.
- [9] E. Fujitu, S. Tahara and K. Ogawa, "Thrust of 2-pole PM linear synchronous motor with halbach array," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference On*, Tahara, S. ; Ogawa, K., 2009, pp. 1-4.
- [10] (2005). *LINEAR MOTORS OVERVIEW; What is a Linear Motor - Principle* [Online]. Disponible en: [http://www.etel.ch/fileadmin/PDF/Catalogs/Linear\\_motors\\_v2.0.pdf](http://www.etel.ch/fileadmin/PDF/Catalogs/Linear_motors_v2.0.pdf).
- [11] K. Halbach. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nucl. Instrum. Methods 169(1)*, pp. 1-10. 1980.
- [12] K. Halbach. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 187(1)*, pp. 109-117. 1981.
- [13] Z. Zhu and D. Howe. Halbach permanent magnet machines and applications: A review. Presented at Electric Power Applications, IEE Proceedings-. 2001.
- [14] M. Thompson T. Practical issues in the use of NdFeB permanent magnets in maglev, motors, bearings, and eddy current brakes. *Proc IEEE 97(11)*, pp. 1758-1767. 2009.

- [15] S. Jang M., S. Lee H. and S. Jeong S. Characteristic analysis of eddy-current brake system using the linear halbach array. *Magnetics, IEEE Transactions On* 38(5), pp. 2994-2996. 2002.
- [16] T. Ofori J. and J. Lang H. A comparative analysis of torque production in halbach and conventional surface-mounted permanent-magnet synchronous motors. Presented at Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95., Conference Record of the 1995 IEEE. 1995.
- [17] S. Jang M., S. Lee H. and I. Yoon K. Design criteria for detent force reduction of permanent-magnet linear synchronous motors with halbach array. *Seok M. Jang*. 38(5), pp. 3261-3263. 2002.
- [18] W. Xiaoyuan, Y. Wang and Q. Wang. Effects of different permanent magnet structures on the air gap magnetic field of linear motors. Presented at Automation Congress, 2008. WAC 2008. World. 2008.
- [19] J. Gieras F. and Z. Piech J., *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems*. Electric Power Engineering Series, 1999.
- [20] E. Levi. Linear synchronous motors for high-speed ground transportation. *Magnetics, IEEE Transactions On* 9(3), pp. 242-248. 1973.
- [21] I. Boldea and S. Nasar. Thrust and normal forces in a segmented-secondary linear reluctance motor. *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution Of* 122(9), pp. 922-924. 1975.
- [22] G. Remy, G. Krebs, A. Tounzi and P. Barre J. Finite element analysis of a PMLSM (part 2)-cogging force and end-effect force calculations. *LDIA 2007* 2007.
- [23] G. Remy, G. Krebs, A. Tounzi and P. Barre J. Finite element analysis of a PMLSM (part 1)-meshing techniques and thrust computations. Presented at Proceedings of 6th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications, LDIA, Lille, France. 2007.
- [24] G. REMY, G. KREBS, A. TOUNZI and P. -. BARRE, "Finite Element Analysis of a PMLSM (part 1) Meshing techniques and thrust computations." 2007.
- [25] G. Remy, G. Krebs, A. Tounzi and P. J. Barre, "Finite Element Analysis of a PMLSM (part 2) Cogging force and end-effect force calculations." 2007.
- [26] L. Medeiros-de H., G. Reyne and G. Meunier, "About the distribution of forces in permanent magnets," vol. 35, pp. 1215-1218, 1999.
- [27] G. E. Dawson, L. Schwalm and E. Unteregelsbacher. A device to measure force angle of a linear synchronous motor. *Industrial Electronics and Control Instrumentation, IEEE Transactions On* IECI-23(4), pp. 406-409. 1976. . DOI: 10.1109/TIECI.1976.351416.

- [28] K. Yoshida, H. Takami, X. Kong and A. Sonoda. Mass reduction and propulsion control for a permanent-magnet linear synchronous motor vehicle. *Industry Applications, IEEE Transactions On* 37(1), pp. 67-72. 2001.
- [29] E. Yoshida K. and I. Weh H. A method of modeling permanent magnets for analytical approach to electrical machinery. *Archiv Für Elektrotechnik* 68(4), pp. 229-239. 1985.
- [30] G. Kang H., J. Hur, B. Lee K. and J. Hong P., "Force Characteristic Analysis of PMLSMs for Magnetic Levitation Stage based on 3-Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network." pp. 2099-2104, 2004.
- [31] J. Wieler G. and R. Thornton D., "Urban maglev – development plans and prospects." in *The 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Daejeon, Korea, October 10-13, 2011.
- [32] R. Thornton, T. Clark, B. Perreault, J. Wieler and S. Levine, "An M3 Maglev System for Old Dominion University," *Maglev Development Project*, December 2008.
- [33] R. Thornton D., T. Clark and B. Perreault, "LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR PROPULSION OF SMALL TRANSIT VEHICLES." in *Proceedings of 2004 JRC: 2004 ASME/IEEE Joint Rail Conference.RTD2004-66020*, Baltimore, Maryland, April 6-8 2004, pp. 1-7.
- [34] I. S. Jung, J. Hur and D. S. Hyun, "3D analysis of permanent magnet linear synchronous motor with magnet arrangement using equivalent magnetic circuit network method." *IEEE Trans. Magn*, vol. 35, pp. 3736-3738, Sept 1999, 1999.
- [35] M. Maggiore and R. Becerril, "Modeling and Control Design for a Magnetic Levitation System." vol. 77, pp. 964-977, 2004.
- [36] G. Xiong and S. A. Nasar, "Analysis of Fields and Forces in a Permanent Magnet Linear Synchronous Machine Based on the Concept of Magnetic Charge." vol. 25, pp. 2713-2719, Mayo 1989.
- [37] F. Profumo, A. Tenconi and G. Gianolio, "Parameters and Forces of a PM Linear Synchronous Motor with Magnetic Guides for Industrial Applications: Computed and Experimental Results." vol. 1, pp. 15-20, 2000.
- [38] F. Profumo, A. Tenconi and G. Gianolio, "Design and Realization of a PM Linear Synchronous Motor with a Very High Thrust/Normal Force Ratio." pp. 1984-1988, 2001.
- [39] Y. Guo G., J. Jin X., J. Zhu G. and H. Lu Y., "Design and Analysis of a Prototype Linear Motor Driving System for HTS Maglev Transportation." vol. 17, pp. 2087-2090, june 2007.
- [40] D. Patterson, A. Monti, C. Brice, R. Dougal and R. Pettus, "Design and Simulation of an Electromagnetic Aircraft Launch System." 2002.

- [41] J. R. Quesada and J. -. Charpentier, "Finite Difference Study of Unconventional Structures of Permanent-Magnet Linear Machines for Electromagnetic Aircraft Launch System." vol. 41, pp. 478-483, 2005.
- [42] X. Zhang, Y. Li and H. Liu, "Analysis of the Magnetic Field and Force of LSM with Permanent Magnet Halbach Array and Ironless Coil." pp. 504-507, July 2011.
- [43] Z. Qi, P. Mengchun and C. Dixiang, "Analytic Calculation of Magnetic field and Force in Halbach permanent Magnet Linear Motor." pp. 77-80, 2011.
- [44] L. Huang, X. Huang, H. Jiang and G. Zhou, "Comparative Study of Magnetic Fields Due to Types of Planar Permanent Magnet Array," pp. 3470-3473, 2010.
- [45] C. Jiefan and W. Chengyuan. Thrust experiment and simulation of permanent magnet linear motor. Presented at Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference On. 2003.
- [46] S. Tahara, Y. Ishida and K. Ogawa, "Thrust characteristics of 2-pole PMLSM composed of flux concentrated arrangement with halbach array." in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference On* Dept. of Archit. & Mechatron., Oita Univ., Oita, Japan Ishida, Y. ; Ogawa, K., 15-18 Nov. 2009, pp. 1-4.
- [47] X. Hao, P. Xing and L. Bai. Design and analysis of moving magnet synchronous surface motor with linear halbach array. *Procedia Engineering* 16(0), pp. 108-118. 2011. . DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.1059.
- [48] K. Hong D., B. Woo C., D. Koo H. and D. Kang H. Optimum design of transverse flux linear motor for weight reduction and improvement thrust force using response surface methodology. *Magnetics, IEEE Transactions On* 44(11), pp. 4317-4320. 2008.
- [49] R. J. Cruise and C. F. Landy. Reduction of cogging forces in linear synchronous motors. Presented at Africon, 1999 IEEE. 1999.
- [50] G. Martinez, J. Atencia, M. Martinez-Iturralde, A. Garcia Rico and J. Florez. Reduction of detent force in flat permanent magnet linear synchronous machines by means of three different methods. Presented at Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International. 2003.
- [51] M. Aydin, Z. Q. Zhu, T. A. Lipo and D. Howe. Minimization of cogging torque in axial-flux permanent-magnet machines: Design concepts. *Magnetics, IEEE Transactions On* 43(9), pp. 3614-3622. 2007.
- [52] Z. Q. Zhu and D. Howe. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines. *Energy Conversion, IEEE Transactions On* 15(4), pp. 407-412. 2000.
- [53] R. Whalley. The response of Distributed—Lumped parameter systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 202(6), pp. 421-429. 1988.DOI: 10.1243/PIME\_PROC\_1988\_202\_144\_02.

- [54] Z. Q. Zhu, Y. Pang, D. Howe, S. Iwasaki, R. Deodhar and A. Pride. Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent-magnet machines by nonlinear adaptive lumped parameter magnetic circuit model. *Magnetics, IEEE Transactions On* 41(11), pp. 4277-4287. 2005.
- [55] A. C. T. Harrie. Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. lumped-parameter systems. *J Micromech Microengineering* 6(1), pp. 157. 1996. Disponible en: <http://stacks.iop.org/0960-1317/6/i=1/a=036>.
- [56] E. C. Lovelace, T. M. Jahns and J. H. Lang. A saturating lumped-parameter model for an interior PM synchronous machine. *Industry Applications, IEEE Transactions On* 38(3), pp. 645-650. 2002.
- [57] I. S. Jung, J. Hur and D. S. Hyun, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters." *IEEE Trans. Magn*, vol. 37, pp. 3653-3657, Sep 2001, 2001.
- [58] Z. Ying. Design strategy for detent force reduction of permanent magnet linear synchronous motor. *J Shanghai Univ (Engl Ed)* 12(6), pp. 548-553. 2008.
- [59] K. Lim C., J. Woo K., G. Kang H., J. Hong P. and G. Kim T. Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motors. *Magnetics, IEEE Transactions On* 38(2), pp. 1157-1160. 2002.
- [60] I. Jung S., S. Yoon B., J. Shim H. and D. Hyun S., "Analysis of Forces in a Short Primary Type and a Short Secondary Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor." vol. 14, pp. 1265-1270, December 1999, 1999.
- [61] A. Nekoubin. Using finite element method for determination of poles number in optimal design of linear motor.
- [62] Y. Chen M., S. Fan Y. and W. Lu S. Performance analysis of linear permanent magnet motors for optimal design considerations. Presented at Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE. 2004.
- [63] Y. Chen M., S. Fan Y. and W. Lu S. Performance analysis of linear permanent-magnet motors with finite-element analysis. *Magnetics, IEEE Transactions On* 44(3), pp. 377-385. 2008.
- [64] G. Otten, T. J. De Vries, J. Van Amerongen, A. M. Rankers and E. W. Gaal. Linear motor motion control using a learning feedforward controller. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions On* 2(3), pp. 179-187. 1997.
- [65] G. Martínez, A. Rico G. and J. Flórez. Simultaneous position and levitation control of permanent magnet linear synchronous machines using vector control techniques. Presented at IEEJ Proceedings of the 4th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA 2003), Birmingham (UK). 2003.

- [66] G. Martínez, M. Martínez I., M. Castelli, A. Rico G. and J. Flórez. Simultaneous motion and normal forces control of flat permanent magnet linear synchronous motors employed as actuators. *Ingenieros Eléctricos D (Aplicaciones En La Industria China)* 126(10), pp. 1303-1307. 2006.
- [67] C. Röhrig and A. Jochheim. Motion control of linear permanent magnet motors with force ripple compensation. Presented at The 3th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, LDIA, Nagano, Japan. 2001.
- [68] S. Zhao and K. K. Tan, "Adaptive feedforward compensation of force ripples in linear motors," *Adaptive Feedforward Compensation of Force Ripples in Linear Motors*, vol. 13, pp. 1081-1092, Dec 2004.



# CAPITULO 3

## **3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y TEORIA DE ELECTROMAGNETISMO APLICADA AL MOTOR LINEAL SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES.**

### **3.1. Introducción al método de elementos finitos.**

Gracias a las aplicaciones de métodos computacionales o métodos numéricos desarrollados en años recientes, existe una mejora en el estudio y análisis de las características del campo electromagnético formado dentro y en las proximidades de un núcleo ferromagnético presente en las maquinas eléctricas.

El origen del método de elementos finitos (MEF) se remonta a la publicación de Courant [1] , que en la década de 1940 discutió por primera vez aproximaciones a trozos en el apéndice de su artículo. En los años 1950 Argyris [2] comenzó a unir numerosas ideas matemáticas tales como partición de dominio, acoplamiento, condiciones de contorno, etc., que componen el método de elementos finitos MEF para el análisis estructural de las aeronaves. En los años 1960, la comunidad de ingenieros introduce el método de elementos finitos, que entre los años 1965 y 1970 jugó un papel importante en las conferencias de Wright Patterson Air Force Base en Dayton, Ohio, EE.UU. La aplicación del MEF a la ingeniería eléctrica se inició en los años 1960 con artículos publicados por Silvester [3] y los otros autores [4,5]. Desarrollos posteriores sobre las condiciones de contorno dieron lugar a la aplicación exitosa del MEF para resolver problemas de dispersión, circuitos microondas y antenas.

La principal ventaja del método es su capacidad para tratar cualquier tipo de geometría y material no homogéneo sin necesidad de alterar la formulación o el código de ordenador. Es decir, se proporciona una fidelidad geométrica y un tratamiento al material sin restricciones. Esto hace que sea uno de los métodos numéricos más

utilizado en todas las ramas de la ingeniería. El método de elementos finitos discretiza las propiedades físicas en el dominio de un objeto real en gran cantidad de elementos; la subdivisión del dominio en pequeños elementos se conoce como mallado o discretización de la geometría. El comportamiento de cada pequeño elemento, el cual tiene una forma regular, se predice por el establecimiento de las ecuaciones matemáticas de comportamiento. Una vez analizado cada elemento del mallado, el algoritmo de cálculo suma todos los comportamientos individuales para predecir el comportamiento real del objeto. Para la solución de problemas en dos dimensiones los pequeños elementos discretizados en el mallado tienen forma normalmente triangular o cuadrada, la **Figura 3.1** ilustra un modelo de mallado.

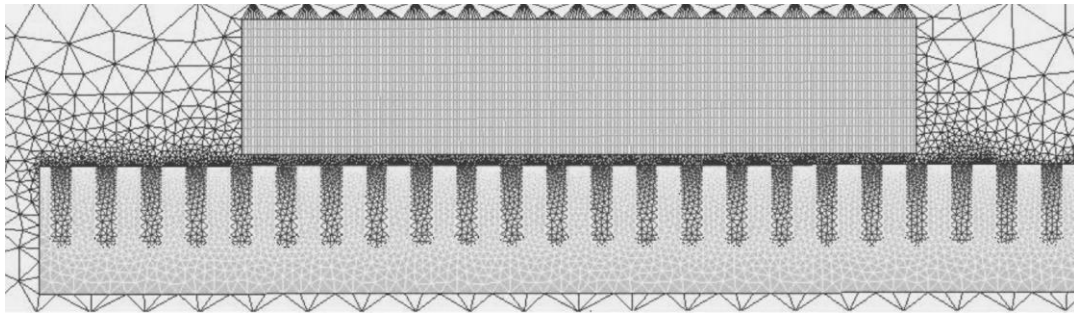


Figura 3.1: Modelo de mallado en 2D del motor lineal.

El conjunto de los pequeños elementos del mallado y su función de forma o interpolación, permite modelar campos arbitrarios y complejos con coeficientes variables que pueden representar los valores de los campos en cada nodo (procedimiento denominado nodo-base) y los valores de campo promedio en el contorno o borde del elemento (borde-base). Un paso siguiente consiste en la aplicación de las condiciones de contorno que lleva a un sistema de matrices de la forma:

$$[A]\{x\}=\{b\} \quad (3.1)$$

Donde  $\{b\}$  es un vector columna de la matriz y está determinado sobre la base de las condiciones de contorno o la excitación forzada (fuente de corriente, incidencia del campo, etc). La matriz  $[A]$  es cuadrada de tamaño  $n \times n$ , muy dispersa y normalmente simétrica a menos que exista un material no recíproco en el dominio computacional [6].

Los modelos bidimensionales también se puede utilizar para generar resultados útiles para una serie de problemas prácticos en electromagnetismo; por ejemplo, la capacitancia de las líneas de transmisión se puede calcular por la solución de las ecuaciones de Laplace en dos dimensiones; también es posible calcular la inductancia por medio de las ecuaciones de Maxwell analizadas en dos dimensiones. El problema puede plantearse en su nivel más fundamental en términos de las ecuaciones de Maxwell, que pueden ser manipuladas para producir una ecuación vectorial del vector potencial magnético  $\bar{A}$  si se omite la corriente de desplazamiento:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \bar{A} = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - (\bar{v} \cdot \nabla) \bar{A} \sigma + \bar{J}_s \quad (3.2)$$

Donde:

$$\nabla \times \bar{A} = \bar{B},$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H},$$

$$\nabla \cdot \bar{A} = 0,$$

$\sigma$  =Conductividad,

$\bar{v}$  = *velocidad*,

$\bar{J}_s$  = *Fuente de corriente*.

En la Ecuación 3,2 los vectores  $\bar{A}$  y  $\bar{B}$  están expresados en términos de posición relativa a un eje de referencia definido y al tiempo. El término  $\bar{v}$  velocidad permite el movimiento de cualquier parte de la máquina respecto al eje de referencia. El vector potencial  $\bar{A}$  en cada nodo de los elementos se calcula entonces con el supuesto de que el potencial varía entre estos nodos de una manera predefinida (por ejemplo, ya sea de forma lineal o de forma cuadrática) [7, 8].

El movimiento lineal de los sistemas electromagnéticos ha sido ampliamente estudiado utilizando un enfoque en los circuitos eléctricos; la precisión en los resultados simulados se basa en el análisis del campo electromagnético. La inductancia del devanado en el estator y la fuerza de propulsión (empuje) se puede calcular desde los parámetros de campo diferencial así como el potencial magnético y la distribución de la

densidad de flujo magnético. El análisis por el MEF permite calcular la distribución de campo magnético en todas las regiones (por ejemplo en el entrehierro), la reacción de armadura, núcleo de armadura y devanado. Para realizar un análisis electromagnético por medio del MEF se debe realizar una adecuada discretización de la región o regiones a analizar. Parte importante en esta discretización es la selección de un mallado apropiado en cada región utilizando el proceso llamado Generador de malla (Mesh generator en inglés). Un cierto número de intentos de generación de malla conduce al refinamiento requerido de cada región. Más tarde se hace el cálculo integral de los parámetros del circuito magnético.

En el siguiente apartado se explicará de manera resumida el modelado matemático de un campo electromagnético en un motor síncrono lineal de imanes permanentes MSLIP utilizando el MEF en 2D y 3D. El modelado en 2D tiene como base el potencial vector magnético, mientras que para la simulación del campo en 3D, el cálculo se realiza utilizando el potencial escalar magnético reducido; al realizar la simulación con un potencial escalar los cálculos se reducen en una tercera parte respecto a los requeridos por la resolución con el potencial vector.

## **3.2. ECUACIONES FUNDAMENTALES.**

### **3.2.1. Potencial Vector de Campo Magnético.**

Se basa en las ecuaciones de Maxwell, las cuales se pueden escribir de forma simplificada de la siguiente manera:

$$\nabla \times H = J; \quad \nabla \times E = -\nabla \times (B \times v) \quad (3.3)$$

Donde  $B$  es el vector de Densidad de flujo magnético,  
 $H$  es el vector Intensidad de flujo magnético,  
 $E$  es el vector de Intensidad de campo eléctrico,  
 $v$  es el vector de velocidad lineal.

La densidad de corriente:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3.4)$$

Donde la conductividad eléctrica es  $\sigma$ .

La representación de movimiento de los imanes permanentes con respecto al sistema de armadura está representado por:

$$-\partial \mathbf{B} / \partial t = 0 \quad \text{y} \quad \nabla \times (\mathbf{B} \times \mathbf{v}) \quad (3.5)$$

También se puede expresar el potencial vector magnético en función de la inducción magnética:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad \text{y} \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.6)$$

El material ferromagnético se puede asumir isotrópico, para esto se debe modelar como un material magnéticamente lineal.

Asumiendo que la permeabilidad magnética del material ferromagnético es no lineal, entonces la intensidad de campo magnético  $[H]$  se puede calcular a partir de la distribución de la densidad de flujo  $[B]$  siendo esta distribución de densidad la obtenida a partir de la solución de la siguiente ecuación [9]:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (3.7)$$

En este caso el operador nabra del potencial vector  $\mathbf{A}$  se expresa con la formula:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{1}_x + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{1}_y + \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{1}_z \quad (3.8)$$

En el caso de una simetría plana o bidimensional 2D se tendrá una única componente no nula (asumiendo que la simetría esta en el plano  $A_x, A_z$  se tendrá la componente  $A_y$  no nula). Para este caso la ecuación diferencial es más simplificada y la descripción del campo magnético es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A_y}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A_y}{\partial z} \right] = J_y \quad (3.9)$$

La densidad de flujo magnético se calcula como un bucle del potencial vector  $\mathbf{A}$  ( $\nabla \times \mathbf{A}$ ),

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = -\frac{\partial A_y}{\partial z} \mathbf{1}_x + \frac{\partial A_y}{\partial x} \mathbf{1}_z \quad (3.10)$$

### 3.2.2. Potencial Escalar de Campo Magnético.

La aplicación del potencial escalar magnético en regiones sin corriente eléctrica es muy utilizada en los paquetes de software de programación CAD que utilizan el MEF como el FLUX o el Opera 3D. El potencial escalar magnético es expresado como:

$$\nabla \cdot \mu \nabla \psi = 0 \quad (3.11)$$

Si se conocen los valores potenciales escalares en los nodos de la malla del MEF, los vectores de intensidad de campo magnético se pueden calcular como:

$$H = -\nabla\psi \quad (3.12)$$

El potencial escalar reducido  $\varphi$  es utilizado en el caso de las regiones con corriente, en este caso la intensidad de campo magnético resultante es la suma de de dos componentes:

$$H = H_m + H_s \quad (3.13)$$

Donde,

$$H_m = -\nabla\phi \quad (3.14)$$

Y

$$H_s = \int_{\Omega_J} \frac{J \times R}{|R|^3} d\Omega_J \quad (3.15)$$

Luego, la ecuación diferencial parcial para una región con conducción de corriente se puede expresar como:

$$\nabla \cdot \mu \nabla \phi - \nabla \cdot \mu \left( \int_{\Omega_J} \frac{J \times R}{|R|^3} d\Omega_J \right) = 0 \quad (3.16)$$

La fuerza electromagnética realizada por un dispositivo magnético se calcula con la integral de la componente normal de la superficie S de la densidad de flujo magnético sobre cada lado de la región. En un sistema de coordenadas cartesianas en 3D, las componentes de las fuerzas electromagnéticas serán:

$$F_{dx} = \int_s \left[ \frac{1}{\mu} B_x (B \cdot n) - \frac{1}{2\mu} |B|^2 n_x \right] dS \quad (3.17)$$

$$F_{dy} = \int_s \left[ \frac{1}{\mu} B_y (B \cdot n) - \frac{1}{2\mu} |B|^2 n_y \right] dS \quad (3.18)$$

$$F_{dz} = \int_s \left[ \frac{1}{\mu} B_z (B \cdot n) - \frac{1}{2\mu} |B|^2 n_z \right] dS \quad (3.19)$$

Existen cuatro métodos para calcular la fuerza o par electromagnético en máquinas eléctricas: el método del Tensor de Esfuerzos de Maxwell (Maxwell Stress Tensor), el método de co-energía, mediante la ecuación de fuerza de Lorentz ( $J \times B$ ) y el método razón de cambio de energía de campo ( $B \partial B / \partial x$ ). El método más utilizado y el aplicado por el software de MEF en esta tesis es el de Maxwell Stress Tensor[9].

### 3.2.3. Maxwell Stress Tensor (MST).

El uso de este método es simple desde el punto de vista computacional, ya que requiere sólo la distribución de la densidad de flujo local a lo largo de una línea o un contorno específico. Usando la definición de MST, las fuerzas electromagnéticas se pueden determinar sobre la base de la densidad de flujo magnético, es decir,

- La Fuerza total,

$$F = \iint \left[ \frac{1}{\mu_0} B (B \cdot n) - \frac{1}{2\mu_0} B^2 n \right] dS \quad (3.20)$$

- Fuerza normal,



$$F_n = \frac{L_i}{2\mu_0} \int [B_n^2 - B_t^2] dl \quad (3.21)$$

- Fuerza Tangencial,

$$F_t = \frac{L_i}{\mu_0} \int B_n B_t dl \quad (3.22)$$

Donde,

$n$  Es el vector normal a la superficie  $S$ ,

$L_i$  Longitud de apilado

$l$  Área o contorno de integración

$B_n$  Componente normal de la densidad de flujo magnético

$B_t$  Componente tangencial de la densidad de flujo magnético.

El par se obtendrá a partir de la ecuación 3.22

$$T = d \times F \quad (3.23)$$

$$T = \frac{L_i}{\mu_0} \oint_1 d B_n B_t dl \quad (3.24)$$

Donde  $d$  es la distancia lineal o radio de la circunferencia en el entrehierro, que en este estudio corresponde a distancia lineal en el entrehierro del MSLIP.

La precisión de este método depende considerablemente en la discretización del modelo y de la selección de la línea de integración o de contorno. El método MST requiere de una línea de integración para una solución precisa en el entrehierro y exige

una buena discretización del modelo puesto que la densidad de flujo en los nodos no es continua [10].

### **3.3. Aplicación del MEF en electromagnetismo.**

Las ecuaciones de Maxwell determinan el comportamiento del campo electromagnético y la interacción de la carga en la materia. Estas ecuaciones en su forma más general se presentan a continuación tanto la forma diferencial como la forma integral junto con las relaciones constitutivas y condiciones de contorno.

En este apartado se trata de resumir las fórmulas fundamentales el diseño de un motor y no se pretende introducir en detalle la teoría del magnetismo. Para obtener información más completa de la teoría de campos electromagnéticos se puede consultar [11].

#### **3.3.1. Las ecuaciones de Maxwell en la forma diferencial.**

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.25)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.26)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.27)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.28)$$

Donde  $J$  y  $\rho$  son los términos de la fuente del sistema;

$J$  = Densidad de corriente [ $A/mm^2$ ],

$\rho$  = Volumen de densidad de carga [ $C/m^3$ ],

En términos correspondientes al campo tenemos a  $B$ ,  $H$ ,  $D$  y  $E$  como funciones vectoriales del espacio y del tiempo:  $B$  = Densidad de flujo magnético [T],  $H$  = Intensidad de campo magnético [A/m],  $D$  = Densidad de flujo eléctrico [C/m<sup>2</sup>] y  $E$  = Intensidad de campo eléctrico [V/m].

Habitualmente en diseño de motores solo se estudian los problemas electromagnéticos en estado semi-estático y la derivada con respecto de tiempo del desplazamiento de la corriente se puede despreciar cuando se compara con la densidad de corriente. Por tal razón la ecuación (3.25) se puede simplificar como:

$$\nabla \times H = J \quad (3.29)$$

Esto implica que mediante la combinación de la divergencia de la ecuación (3.25) con la derivada respecto al tiempo de la ecuación (3.28), las ecuaciones de campo incorporan la conservación de la carga libre, tal como se expresa en la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.30)$$

Las propiedades de los materiales deben introducir un conjunto de ecuaciones que relacionan como primera condición, la inducción del flujo  $B$  y el campo magnético  $H$  en un material:

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) \quad (3.31)$$

En esta ecuación  $\mu_0$  es la permeabilidad del aire igual a  $4\pi \cdot 10^{-7}$  y  $M$  es la magnetización, que puede ser interpretada con una fuente interna de la densidad de flujo en un material.

Otro conjunto de ecuaciones son las que hacen relación a la densidad de corriente y el campo eléctrico en un medio conductor:

$$J = \sigma E \quad (3.32)$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad del medio conductor.

Esta ecuación (3.32) es conocida genéricamente como la ley de Ohm y permite definir la resistencia eléctrica.

Por otra parte, a partir de (3.26) mediante la aplicación de una característica de cálculo de vectores (a partir de la divergencia de la rotación de un vector es nulo) un vector potencial magnético  $A$  se define como:

$$B = \nabla \times A \quad (3.33)$$

### 3.3.2. Las ecuaciones de Maxwell en la forma Integral.

Las anteriores ecuaciones de Maxwell (3.26), (3.27) y (3.29) se pueden formular de forma integral de la siguiente manera, tomando la integral de superficie del rotacional de la ecuación (3.25) y (3.26) sobre una superficie abierta  $S$  limitada por el contorno  $C$ , y aplicando el teorema de Stoke [12]:

$$\oint_C E \cdot dl = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \quad (3.34)$$

$$\oint_S B \cdot dS = 0 \quad (3.35)$$

$$\oint_C H \cdot dl = \int_S J \cdot dS \quad (3.36)$$

Estas ecuaciones de forma integral son usualmente utilizadas para aplicaciones que manifiesten un alto grado de simetría geométrica.

### 3.3.3. Ecuaciones fundamentales del electromagnetismo en medios materiales.

Las ecuaciones de Maxwell teniendo en cuenta la presencia del medio, en las formas diferencial e integral descritas son:

Forma Integral	Forma Diferencial
$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$
$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$
$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_f + \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$	$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$

Para completar el conjunto de ecuaciones fundamentales de electromagnetismo en medios materiales, se deben añadir las ecuaciones denominadas Relaciones Constitutivas de la materia; éstas establecen las propiedades electromagnéticas del medio y la respuesta de un material mediante las relaciones existentes entre la carga, las corrientes de magnetización y los campos externos.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (3.37)$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.38)$$

Para aplicar (3.37) y (3.38) en medios lineales isótopos y homogéneos las Relaciones Constitutivas se reducen a:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad (3.39)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (3.40)$$

Donde  $\varepsilon_r$  y  $\mu_r$  son características determinantes del material.

### 3.3.4. Relación Magnetostática del Método de Elementos Finitos.

Para resolver problemas electromagnéticos mediante el MEF, se emplean técnicas que aplican las dos funciones de potencial, *i)* la función potencial escalar y *ii)* función potencial vector.

*i. Función potencial escalar Magnético.* Su empleo principal se da en aplicaciones de análisis magnetostático en los dominios de  $\Omega_0$  y  $\Omega_1$ . No se tiene en cuenta los efectos del tiempo sobre magnitudes electromagnéticas, es decir no hay variación del campo magnético y eléctrico en el tiempo. Por consiguiente, hace las ecuaciones de Maxwell más reducidas:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s \quad (3.41)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.42)$$

La forma integral de estas ecuaciones se escribe a continuación:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (3.43)$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = nI \quad (3.44)$$

La Ecuación 3.44 corresponde a la ley de Ampere; estas dos ecuaciones son completadas por la relación constitutiva de los materiales, en la forma B(H) o como su forma invertida H(B). Para los materiales lineales e isótropos, la relación B(H) o H(B) se escriben como:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (3.45)$$

$$H = \nu_0 \nu_r (B - B_r) \quad (3.46)$$

Donde;

$B$  Es la densidad de campo magnético en Tesla (T),

$H$  Es la intensidad de campo magnético dado en Amperios por metro (A/m),

$J_s$  Es la densidad de la fuente de corriente en Amperios/metro cuadrado (A/m<sup>2</sup>),

$B_r$  Corresponde al campo magnético remanente,

$\mu_0$  Es la permeabilidad del vacío,

$\mu_r$  Es la permeabilidad relativa del material,

$\nu_0$  Corresponde a la reluctividad del vacío,

$\nu_r$  Es la reluctividad relativa del material, o la inversa de la permeabilidad.

Generalmente para solucionar un problema magnetostático en un programa de simulación mediante el MEF se debe considerar lo siguiente:

- La región ferromagnética del material (hierro).
- Material magnético: imanes permanentes

- Fuentes de corriente (como la que circula por las bobinas de conductor estatórico, en el que se asume que se conoce la distribución de corriente)
- Medio en que se encuentra el material (aire)

En el caso general, se puede considerar que la intensidad de campo magnético  $H$  está conformada por dos términos, un primer término es el que suministra el sistema de excitación generado por la corriente y el otro es el que proviene del campo escalar  $\phi$ ,

$$H = H_s - \nabla \cdot \phi \quad (3.47)$$

Si consideramos que,  $\nabla \times (\nabla \cdot \phi) = 0$ , entonces la ecuación (3.41) se cumple dado que:

$$J = \nabla \times H = \nabla \times (H_s - \nabla \cdot \phi) = \nabla \times H_s - \nabla \times (\nabla \cdot \phi) \quad (3.48)$$

$$\nabla \times H_s = J$$

Generalizando, la utilización de este potencial escalar magnético significa que la solución de cada problema se realiza con la solución de la ecuación en cada punto.

Hay tres formas diferentes para resolver las ecuaciones utilizadas en la función potencial escalar; estas formas son el *Potencial Escalera Reducido*, *Diferencias de Potencial Escalar* y *Potencial Escalar General*.

- *Potencial Escalar Reducido (PER)*; Se aplica cuando la permeabilidad relativa es igual a 1 es decir, cuando no hay fuentes de corriente. Esto permite aplicarse en materiales no lineales o imanes permanentes
- *Diferencia de Potencial escalar (DPE)*; Aplicado en regiones donde las fuentes de corriente son diferentes de cero (0) y donde la permeabilidad de la región es distinta del vacío y no contiene ninguna fuente de corriente, lo que significa que cuando la



integral circular del campo de esta región tiende a cero su permeabilidad tenderá a infinito.

$$\oint H \cdot dl \rightarrow 0 \text{ cuando } \mu \rightarrow \infty \quad (3.49)$$

- *Potencial Escalar General (PEG)*; Se aplica en los casos donde las regiones tienen fuentes de corriente distinta de cero y su permeabilidad distinta a la del vacío conteniendo fuentes de corriente en su interior.
- ii. ***Función Potencial vector Magnético A***. En este método se tiene en cuenta los campos estáticos y dinámicos despreciando el efecto de las corrientes de desplazamiento. La expresión de la inducción magnética se puede obtener en función del potencial vector de la siguiente manera:

$$B = \nabla \times A \quad (3.50)$$

Puesto que  $\nabla \cdot B = \nabla(\nabla \times A) = 0$  se asegura la condición de que las líneas de campo magnético tienen una ruta cerrada independiente de la función discreta.

La relación del vector potencial magnético y la densidad de campo magnético  $B$  expresando las ecuaciones a partir de (3.50) son:

$$\begin{aligned} B &= \nabla \times A \\ H &= \frac{1}{\mu} \cdot (\nabla \times A) \\ \nabla \times H &= \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \cdot (\nabla \times A) \right) = J \end{aligned} \quad (3.51)$$

Esta formulación esta expresada en función del vector  $A$ ; al desarrollar la ecuación (3.51) se puede obtener tres ecuaciones diferenciales en función de las tres componentes de  $A$ . Una característica importante del vector  $A$  es que no es necesario que tenga una orientación física, dado que es una magnitud ficticia que resulta útil para los cálculos electromagnéticos. Un análisis en dos dimensiones resulta ser una aplicación frecuente para estos casos, desarrollándose la ecuación (3.51) para un caso en el plano  $XY$  donde la única componente diferente de cero de  $A$  es la componente correspondiente al eje  $Z$ , mientras que el vector de la densidad de corriente tendrá solamente la componente en el eje  $z$  y perpendicular al plano  $XY$ .

### 3.4. Campo magnético del devanado de armadura.

Es necesario comprender la forma como el campo de armadura genera una fuerza magnetomotriz (FMM) uniforme para un sistema trifásico de corrientes balanceado y distribuido, es expresado de la siguiente manera [14]:

$$\begin{aligned}
 F(x, t) &= \frac{N_1 I_a \sqrt{2}}{\pi p} \sin(\omega t) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} k_{\omega 1 v} \cos\left(v \frac{\pi}{\tau} x\right) \\
 &+ \frac{N_1 I_a \sqrt{2}}{\pi p} \sin\left(\omega t - \frac{1}{m_1} 2\pi\right) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} k_{\omega 1 v} \cos v \left(\frac{\pi}{\tau} x\right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{m_1} 2\pi\right) \\
 &+ \dots \frac{N_1 I_a \sqrt{2}}{\pi p} \sin\left(\omega t - \frac{m_1 - 1}{m_1} 2\pi\right) \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{v} k_{\omega 1 v} \cos v \left(\frac{\pi}{\tau} x\right. \\
 &\quad \left. - \frac{m_1 - 1}{m_1} 2\pi\right) \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \left\{ \sin\left[\left(\omega t - v \frac{\pi}{\tau} x\right) + (v - 1) \frac{2\pi}{m_1}\right] \right. \\
 &\quad \left. + \sin\left[\left(\omega t + v \frac{\pi}{\tau} x\right) - (v + 1) \frac{2\pi}{m_1}\right] \right\}
 \end{aligned} \tag{3.52}$$

Donde;

$I_a$  es la corriente de fase de armadura,

$m_1$  es el numero de fases,

$P$  es el numero de pares de polos,

$N_1$  es el numero de vueltas por fase en serie,

$k_{w1v}$  es el factor de devanado,

$\omega$  es la frecuencia angular corresponde a  $2\pi f$ ,

$\tau$  es el paso polar.

$v = 2m_1k + 1$ , para  $k = 0,1,2,3,4, \dots$  el campo viajero se mueve en dirección positiva,

$v = 2m_1k - 1$ , para  $k = 0,1,2,3,4, \dots$  el campo viaja en sentido contrario o negativo.

También se puede describir la magnitud del  $v_{th}$  armónico de la fuerza magnetomotriz de la armadura [14]:

$$F_{mv} = \frac{2m_1\sqrt{2}}{\pi p} N_1 I_a \frac{1}{v} k_{w1v} = m_1 [F_{mv}] m_1 = 1 \quad (3.53)$$

Donde  $[F_{mv}] m_1 = 1$  es la magnitud de la fuerza magnetomotriz de una fase del devanado de armadura.

Ahora se puede describir el factor de devanado del armónico espacial  $v$  como el producto del factor de distribución  $k_{d1v}$  y el factor de paso  $k_{p1v}$

Así que se tiene la expresión:

$$k_{w1v} = k_{d1v} k_{p1v} \quad (3.54)$$

Siendo:

$$k_{d1v} = \frac{\sin[v\pi/(2m_1)]}{q_1 \sin[v\pi/(2m_1q_1)]} \quad (3.55)$$

$$k_{p1v} = \sin\left(\frac{v\pi\omega_c}{2\tau}\right) \quad (3.56)$$

La onda del  $V_{th}$ -armónico de la velocidad síncrona lineal producida por la FMM se calcula si se supone que  $\omega t \mp v\pi x/\tau = 0$ , quedando de la siguiente forma [14]:

$$v_{sv} = \mp 2f\tau \frac{1}{v} \quad (3.57)$$

En un devanado trifásico la distribución espacial de la FMM resulta:

$$\begin{aligned} F(x, t) = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \left\{ \sin \left[ \left( \omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) + (v-1) \frac{2\pi}{3} \right] \right. \\ \left. + \sin \left[ \left( \omega t + v \frac{\pi}{\tau} x \right) - (v+1) \frac{2\pi}{3} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.58)$$

Si el armónico fundamental  $v = 1$  y con el devanado trifásico, se obtiene lo siguiente:

$$F(x, t) = \frac{1}{2} F_m \sin \left( \omega t - v \frac{\pi}{\tau} x \right) \quad (3.59)$$

$$F_m = \frac{2m_1\sqrt{2}}{\pi p} N_1 I_a k_{\omega 1} \approx 0.9 \frac{I_a N_1 m_1 k_{\omega 1}}{p} \quad (3.60)$$

Se define el valor pico de la densidad lineal de corriente de armadura como el número de conductores en todas las fases del devanado  $2N_1m_1$  veces el pico de la corriente de armadura  $I_a\sqrt{2}$  dividido por la longitud del inducido  $2p\tau$ .

$$A_m = \frac{N_1 I_a m_1 \sqrt{2}}{p\tau} \quad (3.61)$$

Se debe conocer también el factor de forma y de reacción del MSLIP para comprender el funcionamiento del motor. El factor de forma del campo de excitación está definido como la relación de la amplitud del primer armónico y el valor máximo de la componente normal de la densidad de flujo magnético de la reacción de armadura en los ejes  $d$  y  $q$  respectivamente [14].

$$k_{fd} = \frac{B_{ad1}}{B_{ad}} \quad (3.62)$$

$$k_{fq} = \frac{B_{aq1}}{B_{aq}} \quad (3.63)$$

Mediante los coeficientes de las series de Fourier para  $\nu=1$ , se calculan los valores máximos de los primeros armónicos  $B_{ad1}$  y  $B_{aq1}$ :

$$B_{ad1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{0.5\pi} B(x) \cos x dx \quad (3.64)$$

$$B_{aq1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{0.5\pi} B(x) \sin x dx \quad (3.65)$$

### 3.5. Voltaje inducido.

El valor eficaz (*rms*) del voltaje inducido analizado en una fase del devanado de armadura sin flujo de excitación de carga es:

$$E_f = \pi\sqrt{2}fN_1k_{w1}\Phi_f \quad (3.66)$$

Donde,

$N_1$  es el número de vueltas por fase del devanado de armadura,

$k_{w1}$  es el coeficiente de devanado de armadura,

$\Phi_f$  es la densidad de flujo magnético de excitación sin reacción de armadura cuyo armónico fundamental es  $\Phi_{f1}$ .

$$\Phi_{f1} = L_i \int_0^T B_{mg1} \sin\left(\frac{\pi}{T}x\right) dx = \frac{2}{\pi} \tau L_1 B_{mg1} \quad (3.67)$$

De igual manera se describen los voltajes inducidos por el flujo de reacción de armadura determinados por los componentes  $d$  y  $q$  respectivamente:

$$E_{ad} = \pi\sqrt{2}fN_1k_{w1}\Phi_{ad} \quad (3.68)$$

$$E_{aq} = \pi\sqrt{2}fN_1k_{w1}\Phi_{aq} \quad (3.69)$$

Si se tiene en cuenta la fuerza electromotriz (FEM) con carga de la inducción magnética por cada fase con reacción de armadura se tendrá la siguiente expresión:

$$E_i = \pi\sqrt{2}fN_1k_{w1}\Phi_g \quad (3.70)$$

Donde  $\Phi_g$  es el flujo magnético en el entrehierro. La expresión de la FEM en vacío para una reducida corriente de armadura y los flujos  $\Phi_g \approx \Phi_f$  es la siguiente:

$$E_i = 4\sigma_f f N_1 k_{w1} \Phi_g \quad (3.71)$$

La saturación magnética del núcleo de armadura depende del factor de forma  $\sigma_f$  de la FEM. Esto es el resultado de la relación de todas las caídas de potencial magnético del hierro, el entrehierro y los dientes con la caída de potencial magnético del entrehierro. La condición de operación del motor dependerá del estado de la corriente de fase con relación a la tensión de línea; es decir si la corriente esta adelantada con respecto a la tensión, el motor entregará potencia reactiva a la red (motor sobre-excitado); por el contrario si la corriente está atrasada entonces el motor se comportara como un dispositivo inductivo y será un motor sub-excitado. Esta condición me permite construir el diagrama fasorial para comprensión del funcionamiento del motor [10]. La **Figura 3.2** muestra los diagramas fasoriales de un motor sub-excitado y sobre-excitado.

A partir de estos diagramas fasoriales se puede deducir las ecuaciones de tensión:

$$V_1 \sin \delta = -I_{ad}R_1 + I_{aq}X_{sq} \quad (3.72)$$

$$V_1 \cos \delta = I_{aq}R_1 + I_{ad}X_{sd} + E_f \quad (3.73)$$

El ángulo entre la FEM  $E_f$  y la tensión de fase en bornes del motor ( $\delta$ ) dependerá de las caídas de tensión producidas por las resistencias y reactancias del devanado de armadura; estas caídas de tensión dependen de la corriente de carga  $I_a$ . Así se puede deducir que si la corriente es cero, sin carga, el ángulo  $\delta$  que será el ángulo de carga, también será nulo y por consiguiente  $E_f = V_L$ .

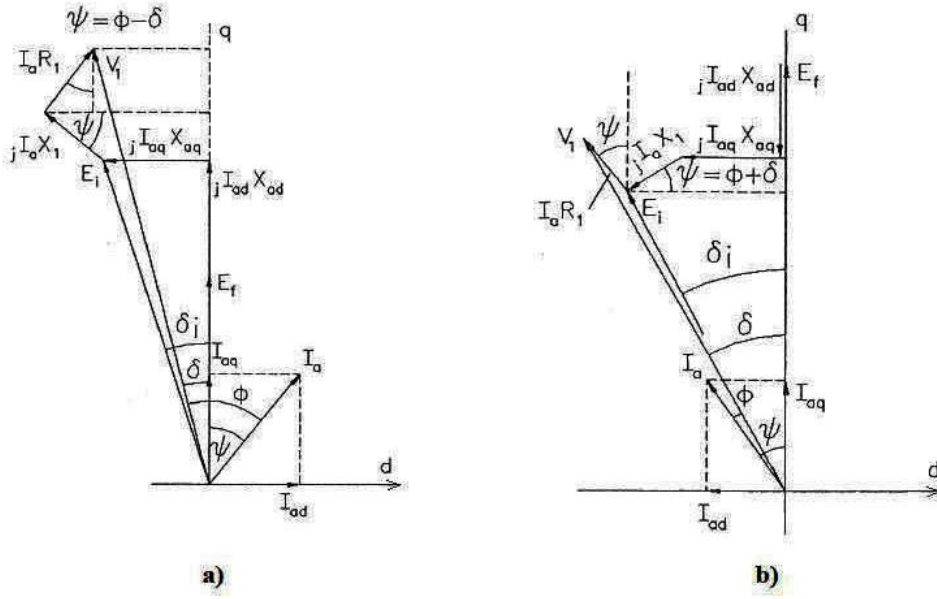


Figura 3.2: Diagrama fasorial del MSLIP. a) Sub-excitado, b) Sobre-excitado[10].

Las corrientes se obtienen a partir de las ecuaciones 3.74 y 3.75 expresadas a continuación:

$$I_{ad} = \frac{V_1(X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_{sq}}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \quad (3.74)$$

$$I_{aq} = \frac{V_1(R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \quad (3.75)$$

La expresión para la corriente *rms* de la armadura es expresada en función de  $V_1, E_f, X_{sd}, X_{sq}, \delta$  y  $R_1$ :

$$\begin{aligned} I_a &= \sqrt{I_{ad}^2 + I_{aq}^2} \\ &= \frac{V_1(X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta)}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \\ &\times \sqrt{[(X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_{sq}]^2 + [V_1(R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1]^2} \end{aligned} \quad (3.76)$$



### 3.6. Potencia electromagnética y empuje del MSLIP.

Se describe la potencia de entrada del motor a partir del diagrama fasorial de la **Figura 3.2**.

$$P_{in} = m_1 V_1 I_a \cos \phi = m_1 V_1 (I_{aq} \cos \delta - I_{ad} \sin \delta) \quad (3.77)$$

Reemplazando las Ecuaciones 3.74 y 3.75 en la Ecuación 3.77 se tiene la expresión:

$$\begin{aligned} P_{in} &= m_1 [I_{aq} E_f + I_{ad} I_{aq} X_{sd} + I_{aq}^2 R_1 - I_{ad} I_{aq} X_{sq} + I_{ad}^2 R_1] \\ &= m_1 [I_{aq} E_f + R_1 I_a^2 + I_{ad} I_{aq} (X_{sd} - X_{sq})] \end{aligned} \quad (3.78)$$

Despreciando las pérdidas en el núcleo de la armadura, la potencia electromagnética es igual a la potencia del motor menos las pérdidas en el devanado de la armadura.

$$\Delta P_{w1} = m_1 I_a^2 R_1 = m_1 (I_{ad}^2 + I_{aq}^2) R_1 \quad (3.79)$$

Entonces se tiene que:

$$P_{elm} = P_{in} - \Delta P_{w1} = m_1 [I_{aq} E_f + I_{ad} I_{aq} (X_{sd} - X_{sq})] \quad (3.80)$$

Por lo cual;

$$\begin{aligned}
P_{elm} = & \frac{m_1 [V_1 (R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1]}{(X_{sd} X_{sq} + R_1^2)^2} \\
& \times [V_1 (X_{sd} \cos \delta - R_1 \sin \delta) (X_{sd} - X_{sq}) \\
& + E_f (X_{sd} X_{sq} + R_1^2) - E_f X_{sq} (X_{sd} - X_{sq})]
\end{aligned} \tag{3.81}$$

Simplificando la Ecuación 3.81 haciendo  $R_1 = 0$ , entonces se obtiene la siguiente expresión:

$$P_{elm} = m_1 \left[ \frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin \delta + \frac{V_1^2}{2} \left( \frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \right] \tag{3.82}$$

Se debe tener en cuenta que para el caso de motores de baja potencia, la resistencia  $R_l$  es muy alta, comparable a las reactancias  $X_{sd}$  y  $X_{sq}$  (la ecuación 3.81 será la adecuada para aplicar a estos motores). Para el caso de motor de gran capacidad, la resistencia de sus devanados resulta ser baja, siendo la Ecuación 3.82 la adecuada para calcular las potencias electromagnéticas en estos casos.

Para determinar el empuje electromagnético de un MSLIP se utiliza la siguiente expresión:

$$F_{dx} = \frac{P_{elm}}{v_s} \tag{3.83}$$

Si se asume que la resistencia del devanado de armadura es nula, entonces se obtiene lo siguiente:

$$F_{dx} = \frac{m_1}{v_s} \left[ \frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin \delta + \frac{V_1^2}{2} \left( \frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \right] \tag{3.84}$$

De esta ecuación 3.84 se puede deducir que el empuje electromagnético está formado por dos componentes: una primera componente es la  $F_{dx\_sinc}$  que es la fuerza de empuje síncrona, función de la tensión de entrada y la  $fem$  de la excitación: esta fuerza tendrá una variación sinusoidal con respecto al ángulo de carga  $\delta$ :

$$F_{dx\_sinc} = \frac{m_1 V_1 E_f}{v_s X_{sd}} \sin \delta \quad (3.85)$$

El otro componente será la fuerza de reluctancia que depende básicamente de la tensión de alimentación:

$$F_{dx} = \frac{m_1 V_1^2}{2 v_s} \left( \frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \quad (3.86)$$

Este empuje también varia con el ángulo de carga  $\delta$  sin embargo su frecuencia resulta ser el doble de la frecuencia del empuje síncrono. En la **Figura 3.3**, se representan las curvas de los empujes síncrono, de reluctancia y resultante de un PMLSM de polos salientes y la **Figura 3.4** muestra el resultado del modelo comparado y propuesto MSLIP en configuración Halbach.

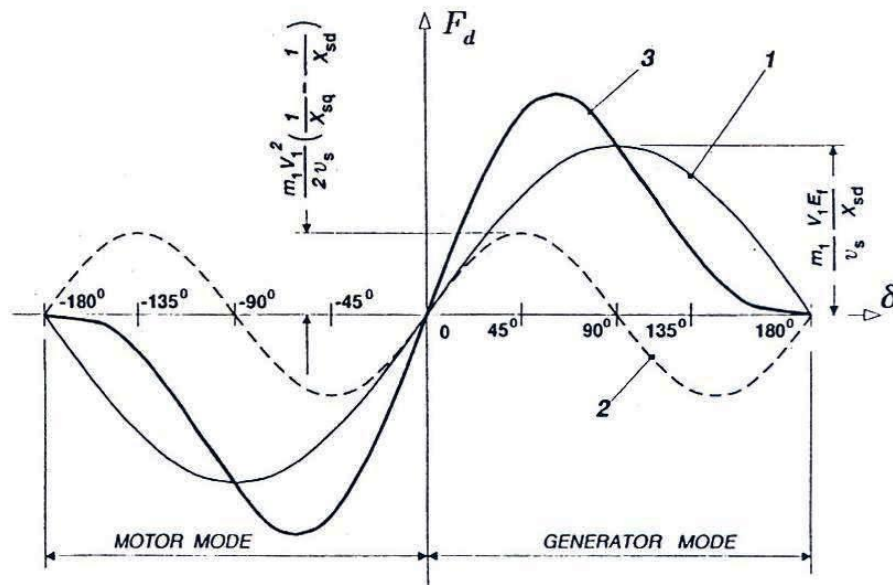


Figura 3.3: Empujes Síncrono (1), de Reluctancia (2) y Resultante (3) del MSLIP de polos salientes [10].

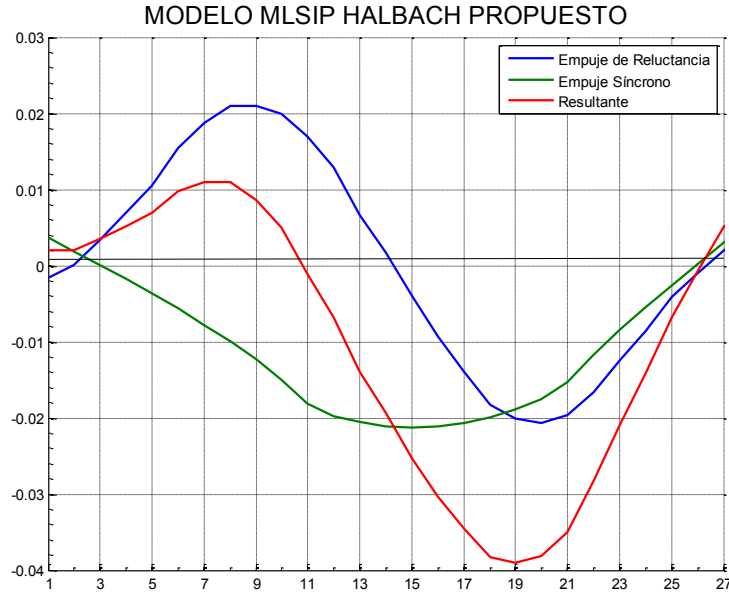


Figura 3.4: Curvas de Empuje Síncrono, de Reluctancia y Resultante del MSLIP propuesto.

### 3.6.1. Cálculo de fuerzas en imanes permanentes en disposición Halbach.

Recordemos que la matriz Halbach es una configuración especial de los imanes permanentes de alto campo magnético con un fuerte flujo de campo sobre un lado de la matriz de imanes y un mínimo campo sobre el lado opuesto de la disposición. A continuación se buscan las expresiones analíticas que permitan realizar una aproximación del campo magnético producido por varios imanes con orientación magnética en diferentes ángulos.

H. Allag en [16] describe de una manera simple el cálculo de las fuerzas entre los imanes en disposición Halbach y un imán independiente en un medio magnético. El modelo del que parte H. Allag en [16], supone una placa magnética de superficie rectangular, con densidad de carga uniforme  $\sigma$  según muestra la **Figura 3.5**.

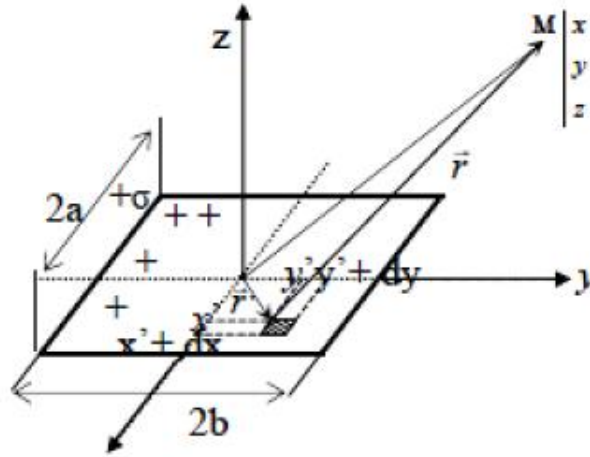


Figura 3.5: Disposición de una placa magnética para el cálculo de potencial y campo magnético [16].

Calculando el potencial escalar en el punto M de coordenadas (X, Y, Z) tomando la ecuación de potencial escalar V dada por:

$$V = \frac{1}{4\pi\mu_0} \iint_S \frac{\sigma - dS}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} \quad (3.87)$$

Su equivalente con las coordenadas cartesianas está dado por:

$$V = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int_{-b}^b dy' \int_{-a}^a \frac{1}{\sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z^2}} dx' \quad (3.88)$$

Que en forma de sumatorio se puede expresar como:

$$V = \frac{1}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \phi(U_i, V_j, W) \quad (3.89)$$

Donde  $\phi$  es la función dada por:

$$\phi(U_i, V_j, W) = -U \ln(r - V) - V \ln(r - U) - W \cdot \tan^{-1} \left( \frac{UV}{rW} \right) \quad (3.90)$$

y  $r$  se obtendrá de la expresión:

$$r = \sqrt{U_i^2 + V_j^2 + W^2} \quad (3.91)$$

Donde;

$$U_i = x - (-1)^i a,$$

$$V_j = y - (-1)^j b \text{ y}$$

$$W = z$$

A partir de la expresión analítica del potencial escalar, el campo magnético  $H$  se puede calcular derivando la ecuación  $H = -\overrightarrow{\text{grad}}(V)$  quedando una expresión de la siguiente forma:

$$H = \frac{\sigma'}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j} \varepsilon(U_i, V_j, W) \quad (3.92)$$

Donde las componentes  $i, j$  son

$$\varepsilon_x = \ln(r - V)$$

$$\varepsilon_y = \ln(r - U)$$

$$\varepsilon_z = \tan^{-1} \left( \frac{UV}{Wr} \right)$$

Al añadir el campo creado por las dos superficies, se obtiene el campo creado por un imán permanente.

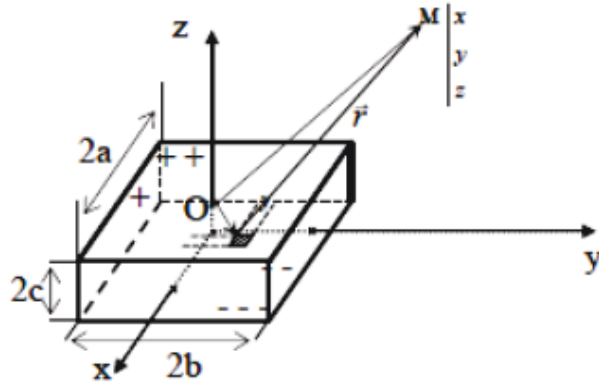


Figura 3.6: Inducción Magnética creada por un imán permanente [16].

La **Figura 3.6** muestra los parámetros geométricos y sus variables intermedias:

$$U_i = x - (-1)^i a ; V_j = y - (-1)^j b \text{ and } W_k = -(-1)^k c$$

$$r = \sqrt{(U_i^2 + V_j^2 + W_k^2)} \quad (3.93)$$

Por último las componentes de la inducción y el campo magnético están dadas por:

$$H = \frac{\sigma}{4\pi\mu_0} \sum_{k=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j+k} \varepsilon(U_i, V_j, W_k) \quad (3.94)$$

$$B = \mu_0 H = \frac{\sigma}{4\pi} \sum_{k=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 (-1)^{i+j+k} \varepsilon(U_i, V_j, W_k) \quad (3.95)$$

Donde  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  y  $\varepsilon_z$  son las mismas variables que se utilizan en la Ecuación 3.93.

De acuerdo a la teoría electromagnética, el campo magnético de un imán permanente se puede describir como el resultado de los campos magnéticos producidos por las corrientes distribuidas en la región magnética y la corriente distribuida por la superficie del imán [17].

La densidad de corriente distribuida en la región magnética será  $\vec{J}_v$ , si el vector de magnetización es  $\vec{M}$ . Esto se satisface en la relación mostrada en la siguiente expresión:

$$\vec{J}_v = \nabla \times \vec{M} \quad (3.96)$$

Si alguna superficie del imán está en contacto con el aire, entonces  $\vec{J}_s$  será la densidad de corriente distribuida por esa superficie del imán y es dada por la siguiente ecuación:

$$\vec{J}_s = (\vec{M} - \overrightarrow{M_{aire}}) \times \vec{n} \quad (3.97)$$

Donde  $\overrightarrow{M_{aire}}$  es el vector de magnetización en el aire y  $\vec{n}$  es el vector normal a la superficie del imán desde un punto externo. El vector de magnetización  $\vec{M}$  y la dirección de este vector forman un ángulo  $\alpha$  que se representa en la ecuación 3.99.

$$\vec{M} = M \cos \alpha \vec{i} + M \sin \alpha \vec{j} \quad (3.98)$$

La **Figura 3.7** muestra la relación del vector de magnetización y el campo magnético producido por una densidad de corriente en la superficie del imán.



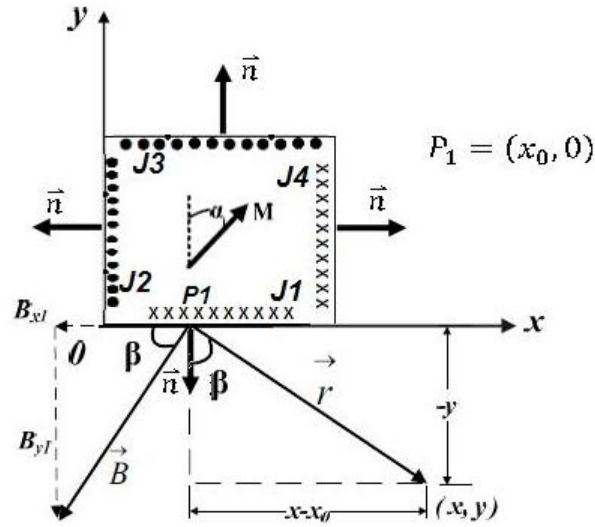


Figura 3.7: Campo magnético producido por una densidad de corriente en la superficie del imán.

Esta figura es representada por las Ecuaciones 3.100 y 3.101 mostradas seguidamente:

$$\sin \beta = \frac{x - x_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + y^2}} \quad (3.99)$$

$$\cos \beta = \frac{-y}{\sqrt{(x - x_0)^2 + y^2}} \quad (3.100)$$

Estas expresiones analíticas permiten expresar de igual manera el campo generado por un imán permanente en función de  $x, y, \alpha$ .

$$\begin{aligned} \vec{B}(x, y, \alpha) &= B_x(x, y, \alpha)\vec{i} + B_y(x, y, \alpha)\vec{j} \\ &= [B_{x1} + B_{x2} + B_{x3} + B_{x4}]\vec{i} + [B_{y1} + B_{y2} + B_{y3} + B_{y4}]\vec{j} \end{aligned} \quad (3.101)$$

Las expresiones analíticas anteriores permiten realizar una aproximación del campo magnético producido por varios imanes con orientación magnética en diferentes ángulos, tal es el caso de la configuración Halbach. Para esta configuración la expresión relacionada del campo magnético producido es la siguiente:

$$\begin{aligned}
\bar{B}_{Halbach}(x, y, \alpha) &= \bar{B}(x - x_1, y - y_1, \alpha_1) + \bar{B}(x - x_2, y - y_2, \alpha_2) \\
&+ \bar{B}(x - x_3, y - y_3, \alpha_3) + \cdots + \bar{B}(x - x_{n-1}, y - y_{n-1}, \alpha_{n-1})
\end{aligned} \tag{3.102}$$

La complejidad de la generación de modelos completos a partir de la aplicación de estas expresiones hace imprescindible el empleo de herramientas de simulación por Elementos Finitos para el estudio y diseño de MSLIP-H.

## Referencias

- [1] R. Courant. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations. *Bull.Amer.Math.Soc* 49(1), pp. 23. 1943.
- [2] J. Argyris. Energy theorems and structural analysis: A generalized discourse with applications on energy principles of structural analysis including the effects of temperature and non-linear stress-strain relations. *Aircraft Eng. Aerospace Technol.* 26(10), pp. 347-356. 1954.
- [3] P. Silvester. Finite element solution of homogeneous waveguide problems. *Alta Frequenza* 38pp. 313-317. 1969.
- [4] P. Arlett, A. Bahrani and O. Zienkiewicz. Application of finite elements to the solution of helmholtz's equation. Presented at Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1968.
- [5] P. Silvester P. and G. Pelosi. *Finite Elements for Wave Electromagnetics: Methods and Techniques* 1994.
- [6] J. Volakis L., A. Chatterjee and L. Kempel C. *Finite Element Metheod for Electromagnetics* 1998.
- [7] J. P. Webb, G. L. Maile and R. L. Ferrari. Finite-element solution of three-dimensional electromagnetic problems. *Microwaves, Optics and Antennas, IEE Proceedings H* 130(2), pp. 153-159. 1983. . DOI: 10.1049/ip-h-1:19830025.
- [8] O. Zienkiewicz C. and R. Taylor L. *The Finite Element Method* 19773.
- [9] J. Gieras F. and H. Sunstrand, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*. USA: CRC Press, 2009.
- [10] J. F. Gieras. *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications* 2002.
- [11] E. Furlani P. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices [Electronic Resource]: Materials, Analysis, and Applications* 2001.
- [12] V. Katz J. The history of stokes' theorem. *Mathematics Magazine* 52(3), pp. 146-156. 1979. Available: <http://www.jstor.org/stable/2690275>.
- [13] J. Gieras F. and Z. Piech J., *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems*. Electric Power Engineering Series, 1999.
- [14] J. Gieras F., Z. Piech J. and B. Tomczuk Z. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems* (Second Edition ed.) 201120.
- [15] T. Heikkilä. Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications-analysis and design. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 2002.

- [16] H. Allag, J. -. Yonnet and M. E. H. Latreche, "3D analytical calculation of forces between linear halbach-type permanent-magnet arrays." in *ELECTROMOTION 2009 – EPE Chapter ‘Electric Drives’ Joint Symposium, 1-3 July 2009, Lille, France, Lille, France, 2009*.
- [17] Z. Qi, P. Mengchun and C. Dixiang. Analytic calculation of magnetic field and force in halbach permanent magnet linear motor. Presented at Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2011 10th International Conference On. 2011.

# CAPITULO 4

## **4 DISEÑO DEL MSLIP CON IMANES PERMANENTE EN DISPOSICION HALBACH (MSLIP-H).**

En este capítulo se desarrolla el modelo de partida del MSLIP-H, motor sobre cuyo diseño se introducirán las mejoras descritas en los capítulos 5 y 6.

Como primer paso en el diseño de un MSLIP de aplicación en sistemas de transporte, se seleccionó un motor eléctrico rotativo síncrono comercial de una potencia en el entorno de los 45 kW y cuyas especificaciones de diseño fueran conocidas. En el apartado 4.1 se justifica la selección de la potencia del motor, motor que será de aplicación en sistemas de propulsión. En el Anexo I se presentan además las bases del diseño de la estructura mecánica que lo podría soportar en una aplicación de transporte rodado. En los apartados 4.2 y 4.3 se desarrolla el diseño del motor a partir del rotativo de referencia y se adapta a la configuración Halbach de los imanes del deslizador. Por último (apartado 4.4) se realiza una validación del modelo numérico de un MSLIP-H mediante el contraste de los resultados conseguidos de un motor similar que ya ha sido validado experimentalmente.

### **4.1Diseño del MSLIP-H para aplicaciones de Transporte.**

Existen diversos modos de aprovechar la fuerza de empuje del MSLIP para propulsar un vehículo. Por motivos económicos se han implementado fundamentalmente sólo dos topologías en la práctica: el MSLIP activo (a veces con superconductores bobinados en vez de imanes en el deslizador) y el MSLIP pasivo con carril guía. Recordemos (cap. 2) que el diseño más extendido con motor síncrono lineal de estator largo para sistemas de levitación fue el empleado en el Transrapid; en él, se aprovecha la fuerza normal de atracción que surge entre los electroimanes que están dispuestos en los lados del vehículo y los conductores del estator instalado por debajo del carril-guía para hacer levitar el vehículo. Dispone además de otros imanes de

orientación que mantienen la estabilidad lateral del vehículo. Sin embargo, en un vehículo propulsado por MSLIPs y soportado por ruedas, la fuerza normal que se establece entre el núcleo estatórico y los imanes es de atracción y puede ser de gran magnitud, lo que incrementa el peso efectivo del vehículo. La fuerza de atracción incrementa la fuerza de fricción existente entre las ruedas que soportan el vehículo y el suelo; por ello se ha de intentar reducir mediante un adecuado diseño del motor o por métodos de control. El denominado funcionamiento en modo masa reducida es un buen ejemplo de ello [1]. En el modo de funcionamiento con reducción de masa cuando el vehículo está soportado por ruedas, la fuerza normal se controla de modo que sea repulsiva y compense el peso total del vehículo; para ello se emplean bobinas de núcleo no ferromagnético, con la subsiguiente reducción de la fuerza de empuje. El motor propuesto en esta tesis se ha diseñado para propulsar un vehículo rodado mediante un deslizador de imanes en disposición Halbach con estator largo de material ferromagnético. La fuerza normal es de atracción. Por lo tanto en el diseño del motor también se ha de evaluar y minimizar, si es preciso, la fuerza de atracción, además de maximizar la fuerza de empuje, manteniendo un rizado mínimo de la misma.

#### **4.1.1. Cálculo de la fuerza de propulsión partiendo de un estudio de fuerzas de empuje mecánico.**

Para realizar el cálculo de las fuerzas necesarias para propulsar una masa (en este caso se seleccionó un autobús), es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La operación del vehículo está limitada básicamente por la aceleración inicial, la velocidad nominal de crucero y la máxima velocidad de crucero. Un tren de potencia capaz de satisfacer esas restricciones funcionará adecuadamente en los otros regímenes de funcionamiento [2].
- Las variables que definen las restricciones de diseño son la velocidad nominal del vehículo, el tiempo especificado para lograr esta velocidad, la velocidad máxima del vehículo, la masa del vehículo y sus dimensiones.

- Las variables de diseño de propulsión eléctrica son: a) la potencia de motor eléctrico, b) la velocidad nominal del motor, c) velocidad máxima del motor y d) la extensión de la gama de velocidades de potencia constante más allá de la velocidad nominal.

El motor eléctrico en su modo normal de operación puede proporcionar empuje nominal constante hasta su velocidad nominal ( $v_n$ ). A esta velocidad, el motor alcanza su límite de potencia nominal. La gama de la operación de potencia constante depende principalmente del tipo de motor particular y de su estrategia de control. Se supone que el motor eléctrico opera en la región de potencia constante más allá de la velocidad nominal y hasta la velocidad máxima.

A Potencia nominal ( $P_n$ ) y velocidad nominal, el empuje resulta:

$$F_{Pn} = P_n / v_n \quad (4.1)$$

La mínima potencia requerida al motor para conseguir mover una masa  $M$  desde 0 a la velocidad nominal ( $v_n$ ) en un tiempo  $t$  es [5]:

$$P_m = \frac{M}{2 * t} * v_n^2 \quad (4.1)$$

Además, la fuerza de tracción  $F$  aportada por el sistema de propulsión del motor se consume en parte para superar la fuerza de resistencia al avance en carretera, (*road load*)  $F_{RL}$ . La fuerza  $F_{RL}$  tiene tres componentes fundamentales:

$$F_{RL} = F_{rod} + F_{rad} + F_{rpnd} \quad (4.2)$$

Donde las variables  $F_{rod}$ ,  $F_{rad}$  y  $F_{rpnd}$  son las fuerzas asociadas a las siguientes resistencias:

- La resistencia de rodadura , que es producida por la fricción de los neumáticos del vehículo y la carretera, es decir la deformación de los neumáticos en la carretera,
- La resistencia aerodinámica debida a la fricción del cuerpo del vehículo en movimiento a través del aire y
- La que corresponde a la resistencia de la pendiente debida a la pendiente que presenta el terreno o carretera por donde circula el vehículo [3, 4].

Y se expresan como:

$$F_{rod} = f_r * M * g \quad (4.3)$$

Donde:

$f_r$ : Coeficiente de rodamiento o rodadura.

$M$ : Masa del vehículo.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

Esta fuerza se incrementa con la velocidad del vehículo y también durante las maniobras de giro.

$$F_{rad} = \frac{1}{2} * \xi * CD * A * v^2 \quad (4.4)$$

Donde:

$\xi$ : Densidad del aire.

$CD$ : Coeficiente Aerodinámico.

$A$ : Área frontal del vehículo.

$v$ : Velocidad del vehículo además de la velocidad del viento.

La resistencia de la pendiente (con signo de operación positivo cuando asciende y signo de operación negativo cuando desciende), viene dada por:



$$F_{rpd} = M * g * \sin \alpha \quad (4.5)$$

Donde:

$M$ : Masa del vehículo.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$\alpha$ : Ángulo de la pendiente.

En el diseño del MSLIP, se asume que la velocidad es independiente de la resistencia de rodadura, la velocidad frontal del viento es cero y estará a nivel de la horizontal. Se tendrá en cuenta además el caso de máxima pendiente; la rampa máxima autorizada en condiciones normales se considera del 3 por ciento [5].

El estudio se aplica al caso un autobús con capacidad de carga de 18.000 kg de peso (estructura estudiada en [6] ). El MSLIP se diseñará en base a los siguientes datos:

- Velocidad inicial y aceleración: 0–13.88 m/s en 12 s;
- Masa del Vehículo en carga: 18.000 kg;
- Área frontal de 9.3726 m<sup>2</sup>
- Coeficiente de Resistencia de Rodadura:  $f_r=0.013$  (neumáticos sobre hormigón);
- Coeficiente de Resistencia Aerodinámico: 0.29;
- Terreno llano;
- Velocidad frontal de viento: 0 m/s.

Conociendo las características del autobús se puede hacer una aproximación de la fuerza total necesaria para mantener el autobús en movimiento a régimen permanente. Para el caso de autobús relacionado, tenemos en consideración el área frontal del mismo que estará en contacto con el aire y provocará una de las fuerzas de fricción o fuerzas aerodinámicas en el vehículo. Se considera inicialmente que el autobús transita por un terreno plano sin pendientes y se asume que el vehículo transita a una velocidad de crucero de 50km/h (aproximadamente 13.88 m/s), asumiendo que es una velocidad media constante para un autobús transitando en un medio urbano [7]. Se calcula la

resistencia aerodinámica del vehículo para esa velocidad. A continuación se realizan los cálculos necesarios para estimar la potencia de diseño del motor.

La potencia mínima del motor es (4.1):

$$P_{min} = 18000 / (2 * 12) * (13.88)^2 = 144,49 \text{ kW}$$

Según las ecuaciones (4.2) a (4.5), la resistencia al avance en carretera tiene tres componentes, que son:

$$F_{rod} = 0.013 * 18000 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$F_{rod} = 2295.54 \text{ N}$$

$$F_{rad} = \frac{1}{2} * 1.29 \text{ kg/m}^3 * 0.29 * 9.3726 \text{ m}^2 * (13.88 \text{ m/s})^2$$

$$F_{rad} = 337.75 \text{ N}$$

Así:

$$F_{RL} = 2633.29 \text{ N}$$

Así la potencia requerida para vencer la resistencia al avance en carretera a velocidad nominal es:

$$P_{req} = 2633,29 * 13,88 = 36,55 \text{ kW}$$

Potencia a la que hemos de añadir la potencia mínima requerida al motor para acelerar hasta velocidad nominal; así resulta que el motor debe tener una potencia nominal aproximada de 180 kW. Con este resultado podemos concluir que para un vehículo pesado con una masa equivalente a 18 toneladas, será necesario que tenga una fuerza de propulsión constante aproximada de 13 kN. Para los transitorios, como el arranque o durante el funcionamiento sobre terreno no horizontal, el sistema de control incrementará convenientemente la corriente aplicada al estator. A la fuerza motriz

estacionaria disponible en el sistema de propulsión se le debe adicionar el efecto de la fuerza de atracción o fuerza normal que se genera en los MSLIPs; esta fuerza depende de la longitud del entrehierro, reduciéndose para grandes espesores de entrehierro, como es el caso del MSLIP a diseñar. Este será uno de los aspectos a comprobar en los diseños descritos en los siguientes capítulos.

En el Anexo I se propone un procedimiento del diseño de la estructura soporte del deslizador del MSLIP.

#### **4.2Diseño del MSLIP a partir de un motor rotativo.**

Se ha calculado en primera aproximación que la potencia nominal del motor a diseñar es de 180 kW; por consideraciones estructurales y de funcionamiento del vehículo (ver Anexo I), se opta por emplear 4 motores iguales de 45 kW en vez de un motor de 180 kW. En consecuencia, el empuje a velocidad nominal que debe aportar cada motor será de 3250 N. Por ello, a partir de ahora, se describe el proceso de diseño de un MSLIP de 45 kW nominales.

Los valores del diseño inicial del MSLIP, son extraídos del modelo de un motor síncrono rotativo de imanes permanentes de 45kW desarrollado por el Departamento de Ingeniería Eléctrica de “Lappeenranta University of Technology LUT (Finlandia)” en cooperación con el fabricante de motores ABB [8]. Más adelante se explicará la transformación topológica del motor rotativo a motor lineal síncrono de imanes permanentes en configuración Halbach ver **Figura 4.1**.

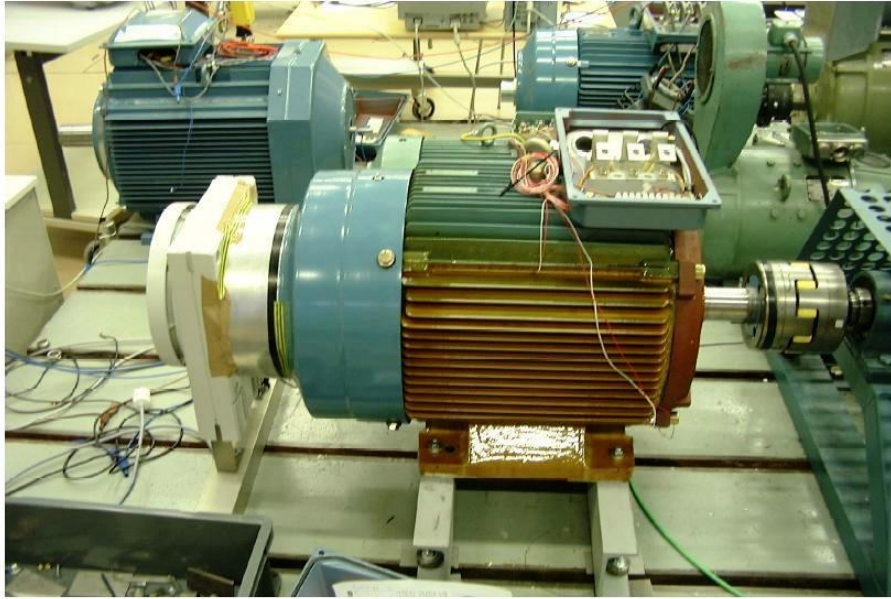


Figura 4.1: Prototipo rotativo 45kW de Imanes Permanentes [8, 9].

Las principales diferencias constructivas entre los motores lineales y los motores rotativos son, haciendo referencia a los motores lineales:

- El inductor está abierto por los dos extremos (en el rotativo evidentemente el inductor está cerrado por la propia geometría).
- El entrehierro es mayor y está ocupado en gran parte por el inducido y las dos holguras mecánicas, pudiendo llegar a ser 10 veces mayor que en las máquinas rotativas. Tener un entrehierro muy grande, aunque es muy interesante en ciertas aplicaciones, obliga a aumentar el número de espiras o la corriente para aumentar la *f.m.m.* y poder mantener una inducción adecuada en él. El aumento de espiras nos hace incrementar la impedancia del motor, y un aumento de la corriente nos hace elevar la temperatura de la máquina; ambos efectos indeseados. Por lo tanto hay que conseguir un equilibrio en función de la aplicación deseada.

Los principales datos del prototipo son mostrados en la siguiente **Tabla 4.1**:

Tabla 4.1: Parámetros prototipo desarrollado por LUT [8].

	Symbol		Value
Frame size			225
Outer diameter	$D_o$	mm	364
Air-gap diameter	$D_\delta$	mm	250
Stack length	$L$	mm	270
Air-gap length	$\delta_0$	mm	1.2
No-Load Voltage	$U_i$	V	368
No load voltage, EMF	$E_{PM}$	V	351
Phases	$m$		3
Nominal power	$P_{nom}$	kW	45
Pole number	$2p$		8
Nominal speed	$n_{nom}$	rpm	600
Stator slots	$Q$		48
Slot per pole and phase	$q$		2
Stator phase resistans	$R$	$\Omega$	0.320
Wires $\varnothing$		mm	1.12 mm $\times$ 6 1.06 mm $\times$ 3
Winding turns	$N_{ph}$ $N_u$		120 serie 15 in slots
Nom. stator current	$I_s$	A	78
Load angle (nom. torque)	$\delta_s$	$^\circ$	49.3
Power factor	$\cos \varphi$		0.972
Nominal torque	$T_{nom}$	Nm	715
Maximum torque	$T_{max}$	Nm	1360
Magnetising inductance	$L_{md}$	H	0.0097
	$L_{mq}$	H	0.0215
Stray inductance	$L_\sigma$	H	0.0081
Mass of magnets	$m_{mag}$	kg	11.7
Mass of copper	$m_{Cu}$	kg	28
Current density in nom. Torque	$S_s$	A/mm <sup>2</sup>	5.3
Winding see app. II			
1 slot skewing in stator			See chapter 3.6

Para las simulaciones electromagnéticas se ha empleado un software de elementos finitos comercial FLUX3D® que permite simulaciones en dos y tres dimensiones.

Tomando simetrías en el modelo en la dirección axial y usando periodicidades en cada polo, el tamaño del problema es de un dieciseisavo de su tamaño original (sin perder ninguna información extra) como se muestra en la **Figura 4.2**. De esta forma el esfuerzo computacional también será mucho menor, permitiendo simular un paso polar.

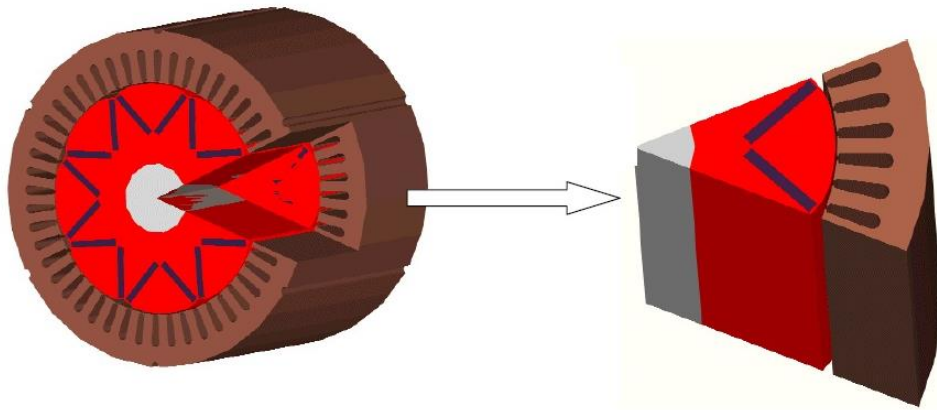


Figura 4.2: Extracción de la porción de modelo a estudiar.

Además de este uso de periodicidades y simetrías, en el modelo se usan algunas simplificaciones respecto al modelo real:

- Forma del arco del polo simplificada.
- No se incluye una pequeña capa de aire alrededor de los imanes (en el modelo real existe una holgura de aproximadamente 0.2 mm entre los imanes y el hierro de rotor, útil a nivel constructivo pero no importante a nivel de resultados).
- Cabezas de bobinas no descritas.

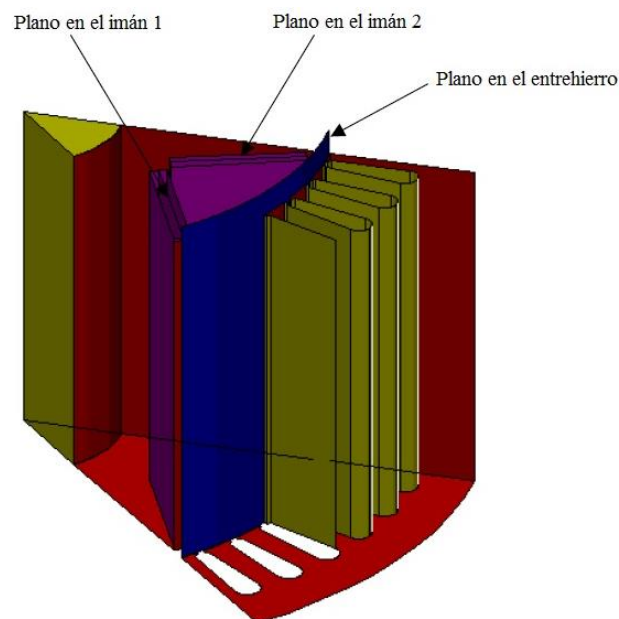


Figura 4.3: Representación de los planos de estudio del flujo magnético en el modelo.

### **4.3 Conversión a MSLIP-H.**

En este apartado se explicará el método para desarrollar la obtención del modelo de motor lineal síncrono deseado a partir del modelo rotativo ya descrito; de forma que las características de ambos sean lo más parecidas posible y así poder realizar una comparativa y conversión relevante.

El modelo que se realizará será simplificado, y no se tendrán en cuenta efectos menores como las vueltas de bobina o el peso del deslizador sobre los imanes permanentes. Sin embargo, para este estudio preliminar será suficiente.

En un principio, el objetivo es desarrollar el motor lineal que sea lo más parecido posible en cuanto a características físicas y geométricas respecto al rotativo. Sin embargo, sí se introducirán algunas modificaciones que se irán comentando a lo largo del capítulo, la más importante de ellas, el uso de los imanes permanentes en configuración Halbach. Además los MSLIPs tienen un espesor de entrehierro mayor y mayores flujos de dispersión laterales que los motores síncronos rotativos, por lo que los resultados derivados de la inclinación de los imanes pueden ser diferentes.

#### **4.3.1 Descripción del Estator y Entrehierro.**

Si se parte de un estator rotativo caracterizado por sus diámetros interno y externo y la longitud axial del cilindro, ahora en el modelo lineal estará caracterizado por las 3 medidas que definen el paralelepípedo en sus 3 ejes.

Se definen los tres parámetros principales del estator; longitud del estator, radio y ancho de ranura y ancho de diente.

- $L_{ESTATOR}$ : Es la longitud del estator tomada en la misma dirección del movimiento del deslizador (equivalente al rotor en el rotativo). Para esta longitud se tienen en cuenta las 48 ranuras y 48 dientes del modelo rotativo. Se conoce el ancho de ranura y ancho de diente para calcular la longitud del estator:

$$A_{\text{ranura}} = 10.6 \text{ mm}$$

$$A_{\text{diente}} = 10.17 \text{ mm}$$

$$L_{\text{ESTATOR}} = 48 \times (A_{\text{Ranura}} + A_{\text{Diente}}) = 996.96 \text{ mm}$$

- $H_{\text{ESTATOR}}$ : Es la longitud en dirección paralelo a los dientes de la armadura; para este diseño corresponde a la altura del estator del prototipo lineal y se obtiene directamente de la diferencia de los radios exterior e interior del estator rotativo.

$$R_{\text{INTERNO}} = 125 \text{ mm}$$

$$R_{\text{EXTERNO}} = 184 \text{ mm}$$

$$H_{\text{ESTATOR}} = R_{\text{EXTERNO}} - R_{\text{INTERNO}} = 59 \text{ mm}$$

- $L_{\text{MAQUINA}}$ : Es la distancia que equivale a la longitud axial del prototipo rotativo; esta medida sigue igual después del proceso de transformación.

$$L_{\text{MAQUINA}} = 280 \text{ mm}$$

Se debe elegir un valor mínimo de entrehierro para el modelo lineal, debido a que el prototipo rotativo tiene un entrehierro variable por la geometría de los imanes permanentes, común en este tipo de motores de imanes superficiales.

Analizando en el modelo rotativo, se puede observar que el entrehierro tiene una variación no uniforme con dos valores extremos a 1.3 mm y 7 mm. Haciendo una ponderación aproximada, y teniendo en cuenta cuánto porcentaje de entrehierro tiene su valor máximo y cuánto tiene el valor mínimo, se coge como valor de base para el ancho del entrehierro inicial en el motor lineal el valor de 5 mm. Un entrehierro de 5 mm es el entrehierro mínimo que se emplea en las aplicaciones habituales que, en el mercado, tienen los motores lineales. Sin embargo en la aplicación de transporte propuesta para el motor lineal se requerirá un entrehierro mayor; el valor de 5 mm se ha tomado como punto de partida para el diseño del motor lineal para poder compararlo con el motor de partida y con los resultados de otros MSLIPs empleados en otras aplicaciones de las que sí se dispone de resultados contrastados.



### 4.3.2 Descripción del Deslizador.

De similar manera, la longitud aproximada que caracteriza al deslizador del modelo viene dada por la ecuación:

$$L_{\_deslizador} = 2 \cdot \pi \cdot R_{\_ROTOR}.$$

Siendo 777,23 mm para el motor de 45 kW (ver **Figura 4.4**).

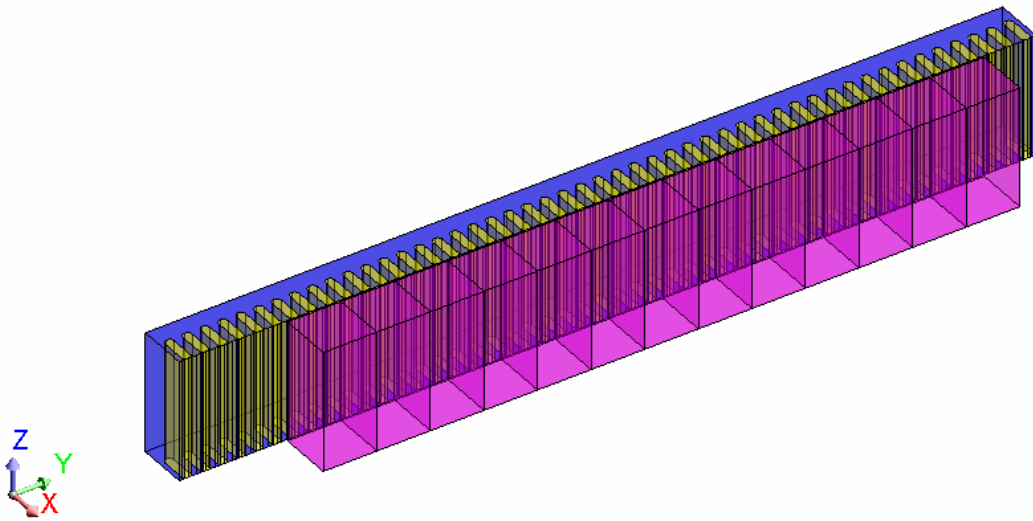


Figura 4.4: Modelo del MSLIP transformado de un motor rotativo de 45 kW.

El coste computacional de la simulación de este motor entero es inasumible por ninguno de los computadores que se han utilizado para la realización de la tesis; además su extensa longitud dificulta hacer correctas mediciones en los casos donde el deslizador deba realizar giros o curvas; por tanto se plantean una serie de medidas para simplificar el modelo que no disminuyan ni desvirtúen el comportamiento real del motor.

### 4.3.3 Selección de los imanes permanentes.

Con el objetivo de incrementar la fuerza de empuje del MSLIP sin incrementar su rizado se realiza el diseño del motor con los imanes en disposición Halbach. La configuración Halbach [10], es la configuración que mejor se adapta a este tipo de motores, reduciendo el “stress” de los propios imanes y concentrando la mayor parte de

flujo magnético en el entrehierro, que es justamente donde éste es deseado (todo el flujo disperso en las otras direcciones no es útil. Recordemos que esta configuración, cuando el deslizador de imanes no es excesivamente delgado, proporciona una mayor amplitud de la onda fundamental de la señal de densidad de flujo en el entrehierro, así como una menor tasa de distorsión armónica.

Los imanes permanentes del modelo son imanes de tierras raras (Nd-Fe-B), cuya característica magnética para el modelo de estudio es de 1.05 de permeabilidad magnética relativa, y 1.15 T de densidad de flujo remanente (ver **Figura 4.5**).

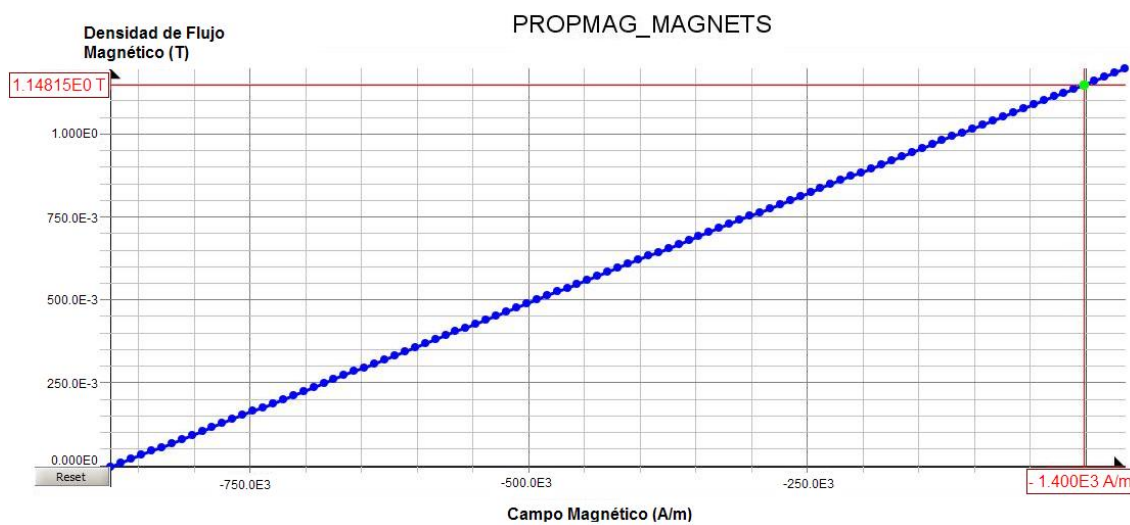


Figura 4.5: Curva característica de Inducción Magnética de los Imanes.

La configuración de la orientación magnética de los imanes tipo Halbach se repite cada cinco imanes; se comprueba que forman un circuito magnético mínimo de 4 polos; por tal razón, el modelo únicamente incluirá un “juego” de configuración de 5 imanes.

La **Figura 4.6** muestra las líneas de flujo de la configuración Halbach, se evidencia la geometría de los cuatro polos que forma el conjunto de 5 imanes.

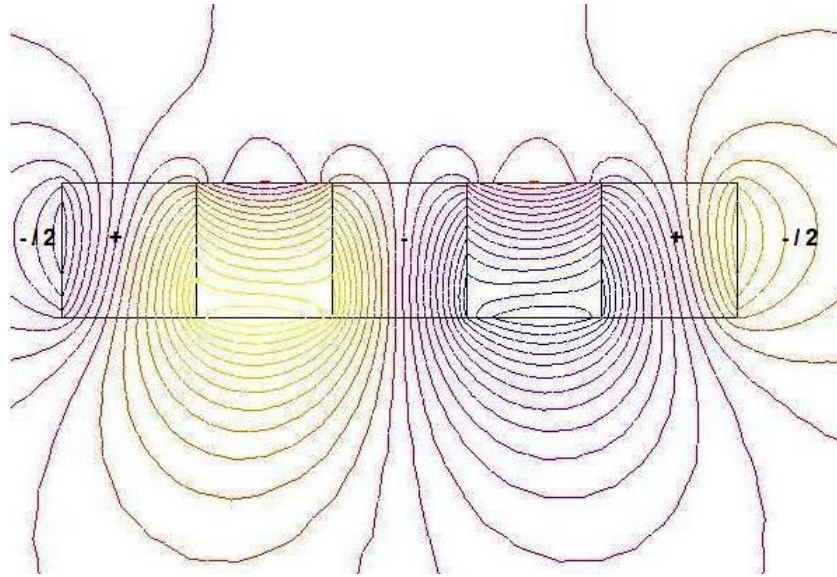


Figura 4.6: Líneas de flujo magnético de Imanes tipo Halbach.

#### 4.3.4 Estator.

Como el estator representa una vía sobre la que circula el deslizador, su longitud debe ser la adecuada para poder realizar las simulaciones de manera correcta. Por tanto, se puede acortar su distancia eliminando ranuras, conservando siempre grupos de ranuras por paso polar y no distorsionar las fases de la corriente por el devanado; así el modelo a estudiar contendrá 36 ranuras.

El estator está construido por chapas de acero (EL\_Steel). Este metal, en principio, no debe conducir corrientes eléctricas; pero en la práctica sí estará expuesto a fenómenos electromagnéticos y tendrá ciertas corrientes parásitas. Este material es el mismo que se usó en el modelo rotativo. Su curva característica es la siguiente: (**Figura 4.7**). Al ser el núcleo de material ferromagnético las fuerzas normales entre deslizador y estator serán de atracción.

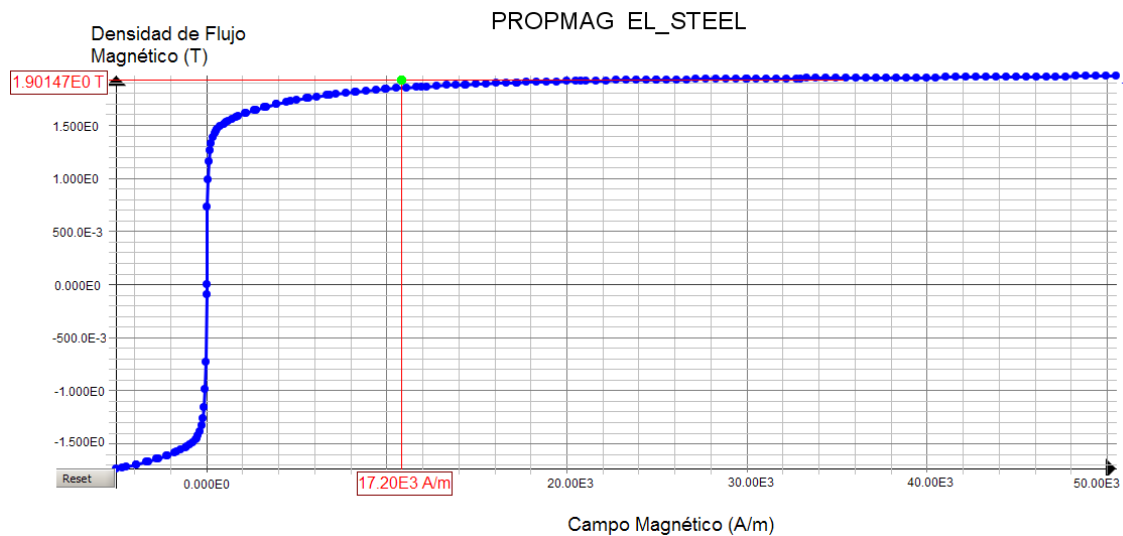


Figura 4.7: Curva característica de inducción magnética del material de la Armadura EL\_STEEL.

En principio se selecciona un estator de ranura abierta, como el del motor de partida. Esta topología aloja un devanado trifásico distribuido en las 36 ranuras de capa sencilla formando 6 polos, con bobina de paso diametral y ranura completa.

El devanado de la armadura para estatores largos y de gran potencia puede ser construido con cable conductor. La **Figura 4.8** ilustra la configuración del devanado trifásico utilizado en la simulación del prototipo.

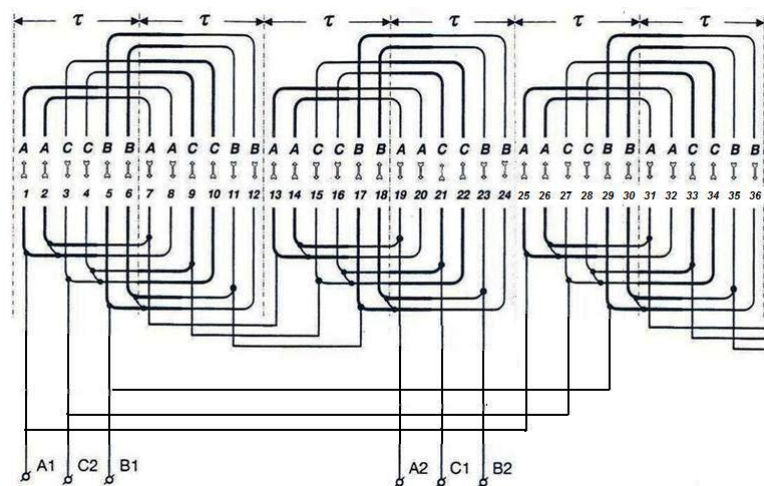


Figura 4.8: Devanado trifásico, seis polos, bobina de paso diametral distribuido en 36 ranuras.

Se define una sección de bobina de 5mm de ancho y 30mm de alto, con lo que se obtiene una densidad de corriente de:

$$J = \frac{I_p}{S * ff} \quad (4.6)$$

Donde  $I_p$  es la corriente máxima o corriente pico,  $S$  la sección de la bobina que es definida en el software de simulación y el factor de llenado de la ranura es  $ff$  que en condiciones ideales de simulación se determina en 1.

Para mantener la mayor analogía posible en cuanto a topología física con el motor rotativo en el que se basa este modelo, inicialmente se aplica la misma intensidad que circula por el bobinado, determinándose una intensidad nominal de 100.76 A.

$$J = \frac{I_p}{S * ff} = \frac{142.49}{150 * 1} = 0.95 \text{ A/mm}^2 \quad (4.7)$$

Por otro lado, es importante saber la posición inicial de los imanes respecto al estator; se ha de intentar que ésta tal que presente mínima reluctancia; como se mencionó anteriormente, la fuerza de diente se produce por la interacción de la estructura de material ferromagnético de la armadura y los imanes permanentes, tratando de alinearse los bordes de los imanes del sistema de excitación con los bordes de los dientes de la armadura. Para reducirla en un primer paso, se parte del principio geométrico de ubicar el centro de cada imán alineado con el centro de un diente de la armadura, consiguiendo así un camino de mínima reluctancia [11].

La fuerza de diente depende únicamente de la estructura física del MSLIP y es independiente de la alimentación del motor. Aun cuando no se haya excitado el motor, la posición del deslizador sufre una variación periódica con respecto al estator. La fuerza de diente se puede calcular mediante el método de variación de energía con respecto a la posición del deslizador. La siguiente expresión muestra esa variación de energía:

$$F = \frac{\partial W}{\partial X} \quad (4.8)$$

Donde;

$$W = \frac{1}{2} \phi^2 \mathfrak{R} \quad (4.9)$$

Con el diseño del motor lineal se busca que el flujo magnético en el entrehierro sea constante, esto permite que la potencia del motor también sea constante, por consiguiente una variación de la reluctancia con respecto al deslizador, afectara la fuerza de propulsión y tendrá una energía variable.

$$F = \frac{1}{2} \phi^2 \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial X} \quad (4.10)$$

Teniendo en cuenta este concepto, el diseño del MSLIP se centrará en disminuir el efecto de la fuerza de diente sobre el empuje electromagnético. Esto se puede lograr mediante la selección del ancho óptimo de los imanes, utilizando ranuras semi-cerradas en el núcleo del estator o aplicando la técnica de inclinar los imanes o las ranuras del estator. Estas serán las técnicas que se aplicarán en el capítulo 5 sobre el MSLIP propuesto.

#### **4.3.5 Mallado de la geometría del modelo simulado.**

Con la definición del mallado se especifica donde debe centrarse el análisis electromagnético. Hay partes que exigen una discretización más fina ya que la densidad de flujo no es continua en las fronteras de los elementos. Se usa la definición de parámetros de puntos y líneas de malla creando mallados de mayor discretización en las caras que intervienen en el entrehierro para después aplicar la herramienta de generación de mallado por extrusión y poder realizar el análisis en 3D (ver **Figura 4.9**).

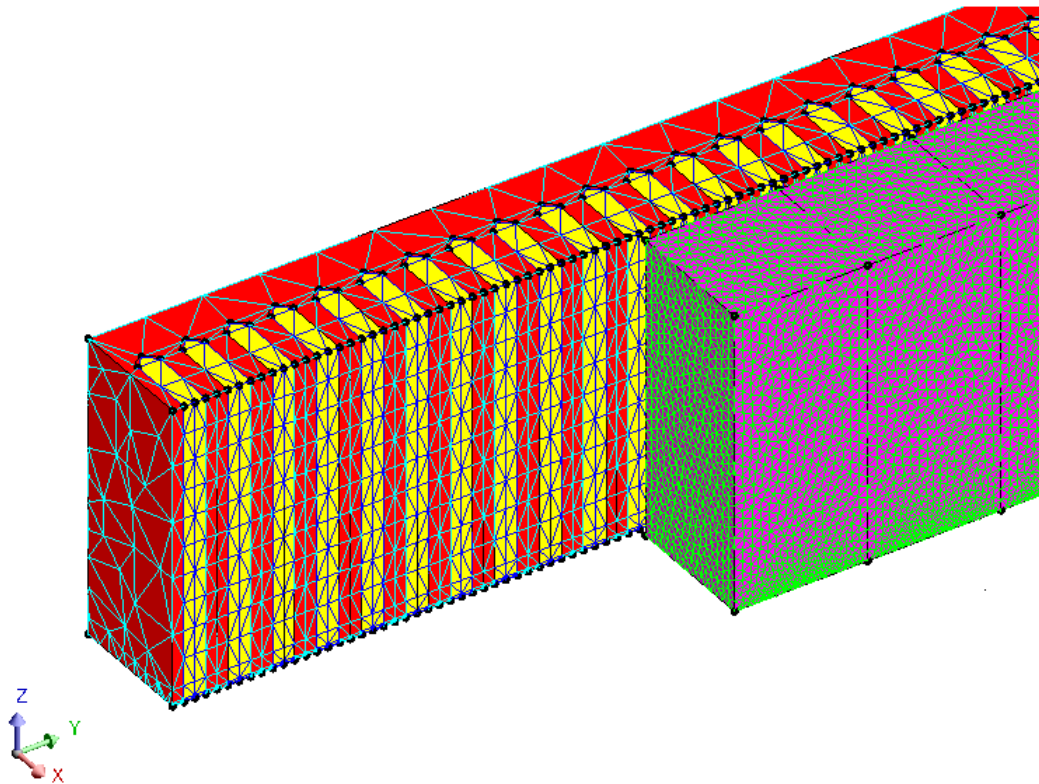


Figura 4.9: Ejemplo de mallado del modelo simulado.

#### EJEMPLO DE RESULTADO DE MALLADO:

Volume elements:

Number of elements not evaluated:	0 %
Number of excellent quality elements:	45.34 %
Number of good quality elements:	33.16 %
Number of average quality elements:	18.22 %
Number of poor quality elements:	3.28 %

---

Number of nodes:	69751
Number of line elements:	11195
Number of surface elements:	93598
Number of volume elements:	276197
Mesh order:	1st order

---

Value of parameter INTENSIDAD:	142.49
Value of parameter POLES:	4
Value of parameter DESP_DESLIZ:	93.465
Value of parameter TIME:	0.0125

Check Mesh executed.

#### 4.4 SIMULACIÓN DEL MSLIP-H.

En el programa de simulación se ha de definir la velocidad de sincronismo a la que se desplazará el deslizador. Se recurre a la expresión (3.84), que para un valor de frecuencia de alimentación de 50 Hz y un paso polar de 124.62 mm resulta:

$$v_s = 2 * \tau * f_e = 12.462 \text{ m/s} \quad (4.11)$$

Recordemos que para realizar el análisis estructural inicial del MSLIP-H, en el apartado 4.1.1 se tomó una velocidad de crucero de 50 km/h, superior a los 44,9 km/h que aporta el diseño electromagnético. En la práctica será el control de velocidad el encargado de adaptar la frecuencia de alimentación estatórico según los requerimientos del conductor.

En la **Figura 4.10** se muestra la sección longitudinal del MSLIP-H a simular. Recordemos que el deslizador está formado por cinco imanes en disposición Halbach. La configuración Halbach es el que mejor concentra y distribuye el campo magnético de los imanes hacia la zona activa del motor en el entrehierro en combinación con el flujo producido por la excitación de las bobinas de la armadura como se muestra en la **Figura 4.11**.

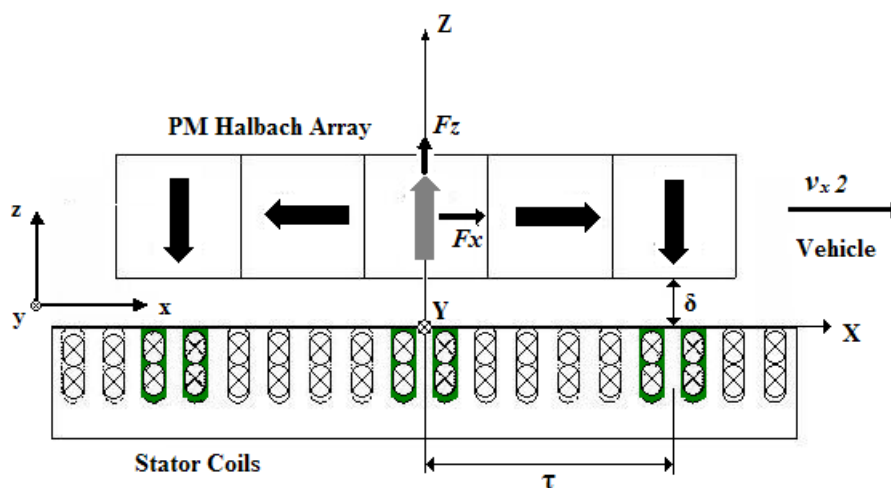


Figura 4.10: Sección longitudinal del MSLIP propuesto en configuración Halbach.



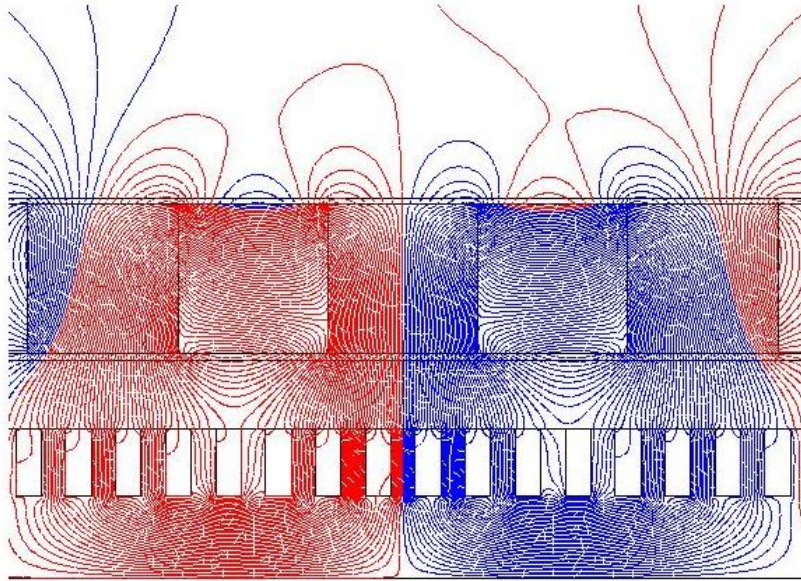


Figura 4.11: Líneas de flujo concentradas en el Entrehierro del MSLIP en configuración Halbach.

Los parámetros del primer prototipo de motor lineal desarrollado se describen a continuación (**Tabla 4.2**).

Tabla 4.2: Parámetros prototipo lineal transformado del motor rotativo de 45 kW.

MODELO		LIN_5AG_0T		
Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor	
Longitud Imán	$l$	mm	62.31	
Paso de Ranura	$\tau_r$	mm	20.77	
Relación	$l / \tau_r$		3	
Corriente	$I$	A	71.4	
Densidad de Corriente	$J$	A/mm <sup>2</sup>	0.476	
Velocidad sincronismo	$v_s$	m/s	10	
Paso polar	$\tau_p$	mm	124.62	
Entrehierro	$AG$	mm	5	

#### 4.4.1 Resultados del modelado en régimen estacionario del MSLIP-H con ranura abierta.

Utilizando el método de elementos finitos, se realizan los siguientes análisis:

*Análisis estático:* Este estudio proporciona la información del comportamiento electromagnético del motor sin corriente por los devanados del estator. En este caso, se

utiliza el parámetro de diseño del deslizador (DESP\_DESLIZ) que indica la posición inicial del dispositivo móvil y el desplazamiento del deslizador respecto del estator.

*Análisis dinámico:* Es el estudio transitorio que permite observar el comportamiento dinámico del modelo del MSLIP-H usando como variable de control el desplazamiento lineal del deslizador en el tiempo (desplazamiento de un paso polar con respecto del estator); se aplica corriente a los devanados del estator.

#### **4.4.2 Análisis Estático del MSLIP-H.**

En este análisis se utiliza un desplazamiento estático, dónde se puede analizar el comportamiento del deslizador paso a paso para calcular la fuerza de diente que presenta el modelo; basta con simular el desplazamiento del deslizador una longitud de un paso de ranura, que para este modelo es de 20.77mm.

Con el fin de analizar si el patrón de malla definido es lo suficientemente bueno, la fuerza de diente se calculó mediante el uso de tres mallas diferentes:

-La primera de ellas se basa en elementos de primer orden con la malla que se describe en el plano 2D, la malla se obtiene mediante el uso de generadores automáticos y mapeadas de malla. Luego un generador de mallas de acoplado, llamado "SLOT\_LINK", se introduce para las caras de la ranura con el fin de lograr un patrón de malla idéntica en todas las ranuras. El generador de malla asignada se introduce en las caras de los imanes y el Entrehierro. La discretización del modelo se realiza a través de mallado punto y las definiciones del mallado-línea.

-El segundo cálculo se basa en el mismo mallado introduciendo elementos de segundo orden y,

-El tercer cálculo fue mejorado con un mallado de 2º orden más denso que el anterior aplicado a la región del entrehierro.

Las **Figura 4.12** muestra los resultados de la fuerza de diente del MSLIP-H calculada aplicando al modelo los dos primeras formas de mallado, un primer mallado con elementos de primer orden descrita en el plano 2D y luego introduciendo un

mallado con elementos de segundo orden; los valores máximo y mínimo de fuerza obtenidos son de 462 N y -300N.

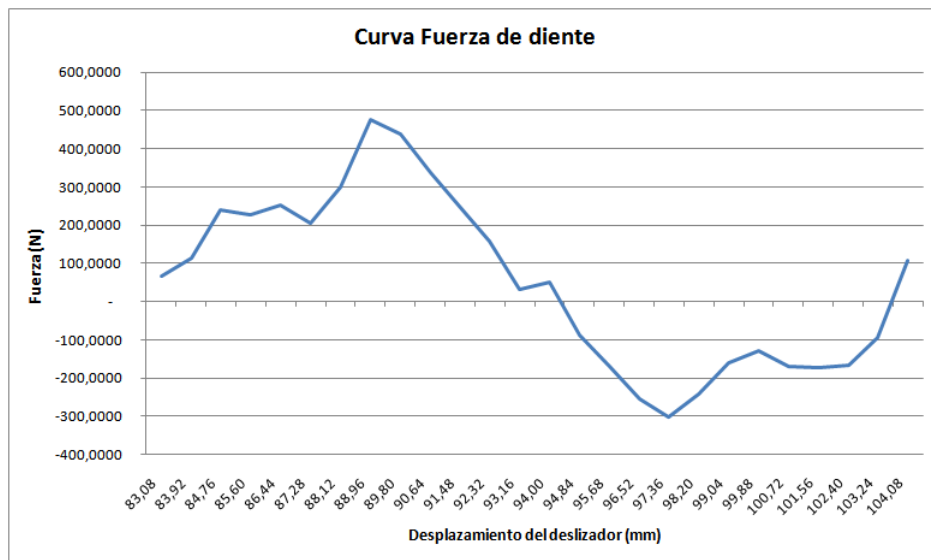


Figura 4.12: Fuerza de diente modelo de MS de 45kW convertido a lineal.

La **Figura 4.13** muestra la comparación de los tres mallados aplicados al modelo rotativo inicial. Se puede observar que el modelo lineal transformado tiene un comportamiento casi igual al modelo rotativo.

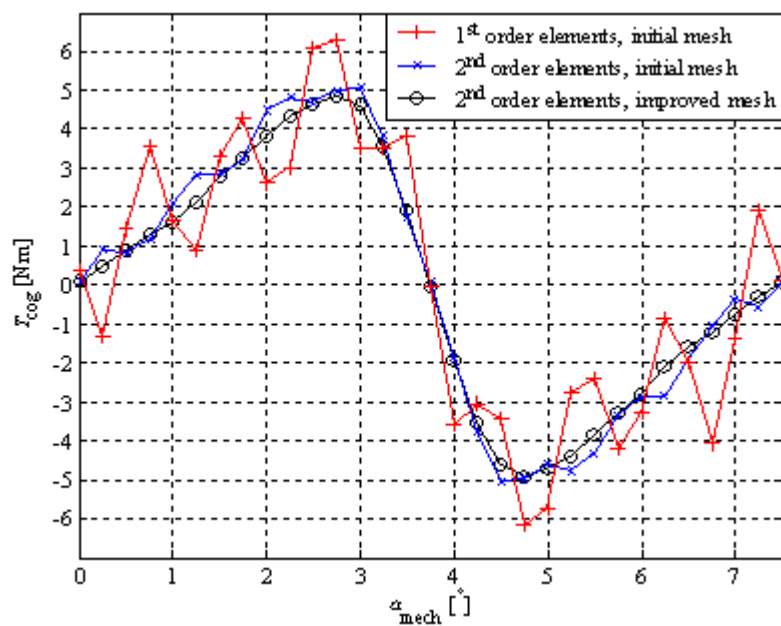


Figura 4.13: Forma de onda de la fuerza de diente como una función de la posición angular del modelo rotativo calculado con diferentes mallados.

También se empleó para su cálculo el software de elementos finitos en 3D (FLUX3D®.) como se muestra en la **Figura 4.14**.

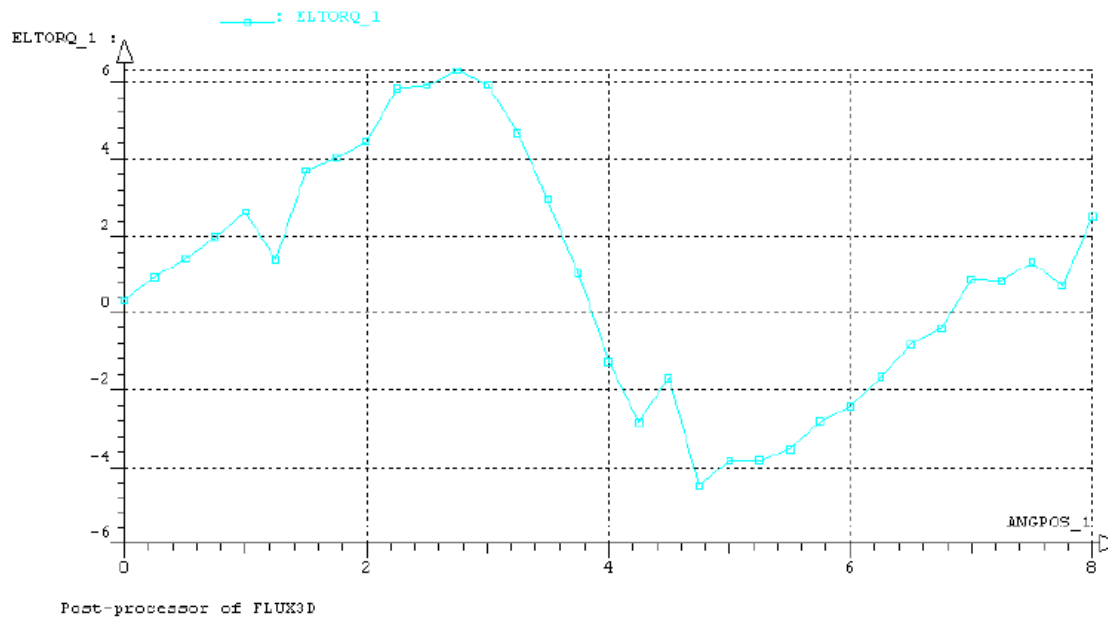


Figura 4.14: Forma de onda de la fuerza de diente obtenida desde FLUX3D®.

A continuación se muestran los resultados del flujo magnético en el entrehierro del modelo estático del MSLIP-H. La **Figura 4.15** muestra la componente normal al movimiento del flujo magnético del deslizador tomada en el entrehierro:

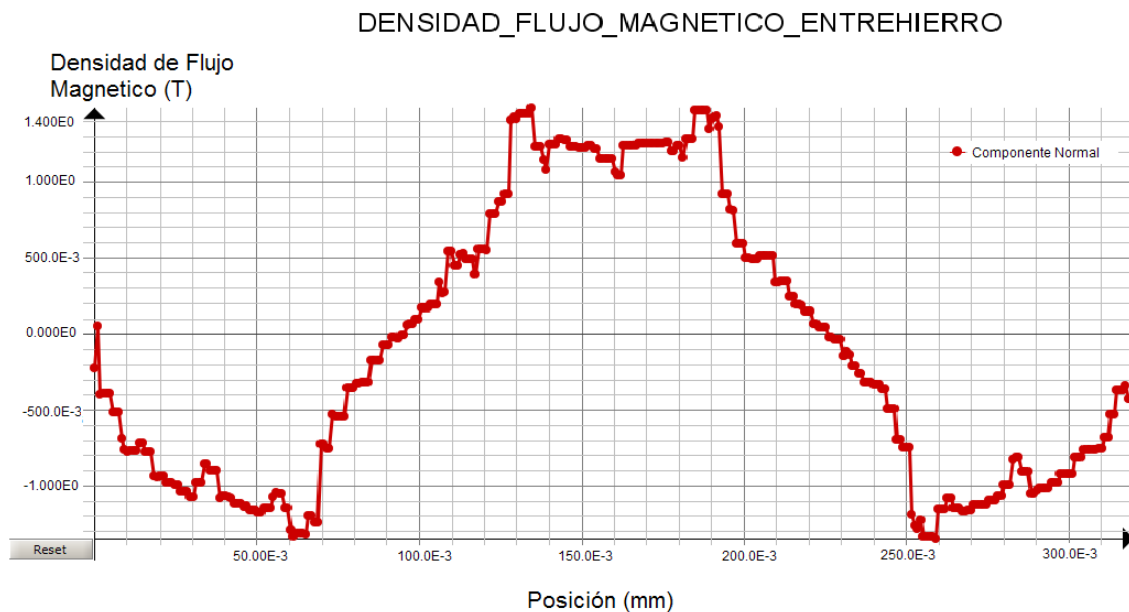


Figura 4.15: Componente normal en dirección del eje x de la Densidad de Flujo en el entrehierro.

#### 4.4.3 Análisis Transitorio: Fuerza de empuje y Fuerza de rizado.

El análisis transitorio se realiza mediante la aplicación “Transient Magnetic 3D” del software CAD utilizado. En este estudio se usa como variable de control el tiempo, además de incluir el bobinado con sus respectivas características de diseño.

Se calcula previamente el tiempo de simulación necesario para analizar el fenómeno creado en el deslizador desplazándose un paso polar.

$$t_{simulación} = \frac{\tau_p}{v_l} \quad (4.12)$$

Se sabe que la velocidad lineal establecida (ecuación 4.11) para este primer modelo es de 12.462 m/s; el paso polar se deduce de la siguiente expresión:

$$\tau_p = \frac{\tau_s * Z_1}{2p} \quad (4.13)$$

Donde:

$\tau_s$ : es el paso de ranura (20,77 mm),

$Z_1$ : es el número de ranuras (36),

$2p$ : es el número de polos del estator (6).

Por consiguiente el paso polar es igual a 124.62 mm

Aplicamos la ecuación 4.13 en 4.12 y obtenemos el tiempo de desplazamiento del deslizador en una distancia de un paso polar.

$$t_{simulación} = \frac{\tau_p}{v_l} = \frac{124.62 \text{ mm}}{12462 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 0.01\text{s} \quad (4.14)$$

Una vez definidos los parámetros de velocidad, frecuencia, tiempo de desplazamiento y distancia recorrida, se realiza la simulación del modelo. El tiempo de duración de la simulación varía entre 25 y 30 horas dependiendo de la calidad del mallado establecido en el modelo. Todos los modelos se realizan con el software FLUX3D®.

La **Figura 4.16** indica el comportamiento de la fuerza de propulsión del modelo simulado; ésta presenta una fuerza promedio de 2198,24 N. Presenta una amplitud del rizado media de 474 N.

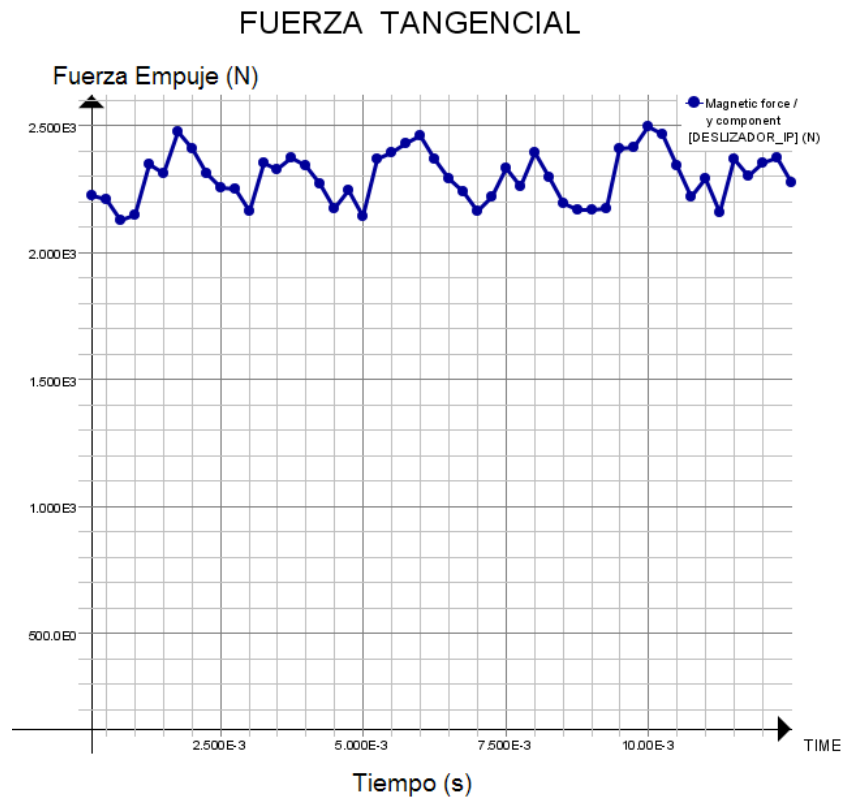


Figura 4.16: Fuerza de Empuje del deslizador para el modelo inicial de MSLIP-H.

El rizado de la fuerza de empuje (*Thrust ripple* en inglés) también se puede expresar como el valor eficaz del rizado ponderado con el valor medio de la fuerza de empuje  $F_{dx}$  desarrollada por el MSLIP [9].

$$f_r = 1/F_{dx} \sqrt{\sum_v F_{dxv}^2} \quad (4.15)$$

Que para el MSLIP-H inicialmente diseñado es de  $f_r=0.389$ .

Como se ha descrito anteriormente, también es importante conocer las fuerzas normales que intervienen en este modelo; por eso también se analiza la fuerza normal que para este caso es la fuerza de atracción del dispositivo (**Figura 4.17**), tiene un valor medio de 11,62 kN, más de 5 veces superior a la fuerza de empuje.

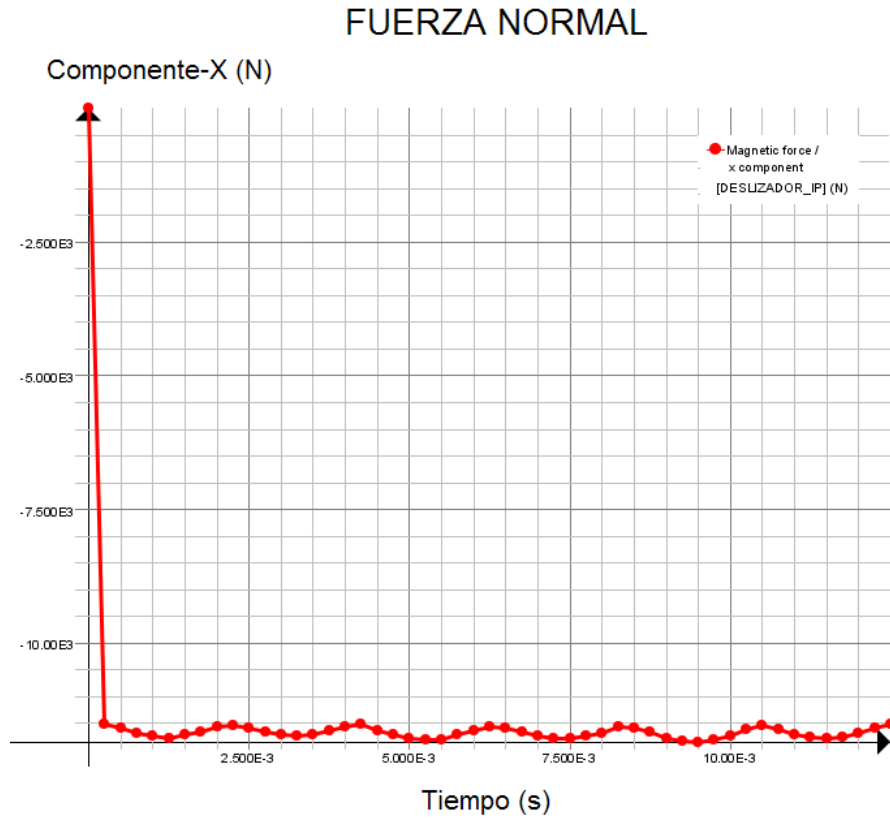


Figura 4.17: Fuerza Normal o de atracción del modelo transformado en lineal.

Se realiza el cálculo simple de fuerzas de empuje para saber cuál es la potencia resultante para este modelo transformado; los resultados son los siguientes:

$$F_{dx} = \frac{P_{elm}}{v_s} \quad (4.16)$$

Donde:

$$P_{elm} = F_{dx} * v_s = 2198.245 \text{ N} * 12.462 \text{ m/s} = 27394.53 \text{ W} \quad (4.17)$$

Es decir que la potencia entregada por el MSLIP transformado es de 27.4 kW aproximadamente. Es inferior a los 45 kW debido a que el MSLIP se diseña con un entrehierro mayor que el del rotativo para adaptarlo a las condiciones de funcionamiento del motor lineal. Por otro lado, la disposición Halbach incrementa el empuje respecto a la configuración convencional de los imanes. Habrá que evaluar más adelante si el empuje que proporciona es suficiente para la aplicación propuesta.

En el capítulo 5 se describen las propuestas y mejoras realizadas sobre este motor lineal transformado para cumplir con el objetivo principal de esta tesis, que es el diseño de un MSLIP-H para aplicaciones a un sistema de transporte y/o de carga, con elevada fuerza de empuje, bajo rizado, y reducida fuerza normal.

Pero antes de finalizar el presente capítulo, se presentan las simulaciones realizadas para validar las ya mostradas en los apartados 4.4.2 y 4.4.3 del presente capítulo de la tesis.

#### **4.5 Modelo Numérico validado.**

Con el objetivo de validar los resultados del modelo de MSLIP-H realizado por el autor de la tesis se ha desarrollado un modelo de un MSLIP-H lo más parecido posible al propuesto, pero del que ya se dispusiera de resultados contrastados experimentalmente.

Tras una intensa búsqueda bibliográfica, como trabajo de referencia se ha encontrado una sola posibilidad que se ajustara a los objetivos de la tesis: el estudio de MSLIPs en disposición Halbach realizado por Seok et al [12]. En el mencionado estudio se presenta el comportamiento de MSLIPs con núcleo ferromagnético, utilizando patrones de magnetización de los imanes permanentes del deslizador en tres tipos de configuraciones tales como vertical, horizontal y Halbach; esta última es la configuración tomada como modelo para validar y comparar con la propuesta planteada



en esta tesis. Los resultados obtenidos por Seok surgieron del estudio de los modelos analíticos y los modelos numéricos realizados mediante el método de elementos finitos.

Se ha reproducido el prototipo definido por los parámetros mostrados en la **Tabla 4.3** [12]. Se obtuvieron las señales de densidad de flujo magnético (en dirección normal y tangencial al movimiento) y fuerza de empuje al ser las representadas en [12].

Tabla 4.3: Especificación de parámetros de MSLIP con núcleo ferromagnético [12].

Values of parameter	Parameters
$N = 150$ (turns)	Turns of coil
$\tau = 51$ (mm)	Pitch of pole
$\tau_m = 25.5$ (mm)	Length of magnet
$\tau_s = 25.5$ (mm)	Iron-core of horizontal array
$\Delta = 25.5$ (mm)	Height of magnet
$x_0 = 5$ (mm)	Air gap
$\Gamma = 6$ (mm)	Height of coil
$\phi = 3$ (phase)	A number of phase
$w = 25.5$ (mm)	Dept of motor
$p = 2 + 1/4$	Pole pairs
$i_{\max} = 1$ (A)	Max current per phase
$v_z = 160$ (mm/sec)	Velocity of z-axis

La geometría utilizada para validar el modelo de motor se muestra en la **Figura 4.18**, en donde representa un prototipo de MSLIP-H, con estator ferromagnético ranurado y devanado trifásico. No se utiliza un respaldo de hierro para los imanes debido a que su configuración Halbach no requiere de este soporte; la fuerza que actúa sobre los imanes en configuración Halbach es debida a las corrientes de excitación del estator y se obtiene a través de tensor de esfuerzos de Maxwell; en este trabajo es obtenido mediante el MEF aplicando la técnica Tensión de Esfuerzos de Maxwell con sistema CAD de electromagnetismo.

Los ejes de coordenadas se eligen de modo que el eje  $x$  indica la dirección del movimiento del deslizador; el vector densidad de corriente sigue la dirección  $y$ .

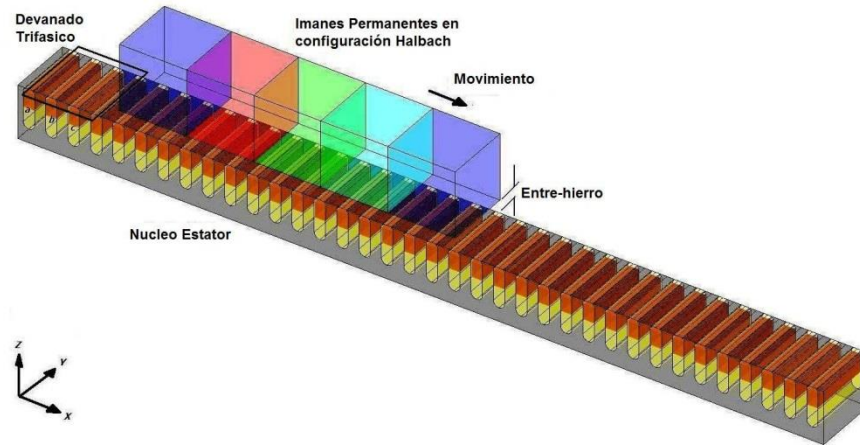


Figura 4.18: Modelo construido para validar prototipo inicial del autor Seok et al.

Los resultados del modelo simulado, calculados por el método de elementos finitos son comparados con los indicados en [12] y se muestran en la **Figura 4.19A y B** respectivamente. Son los resultados de la densidad de Flujo Magnético en dirección tangencial al movimiento del deslizador, que como se puede apreciar, son prácticamente iguales en las dos gráficas.

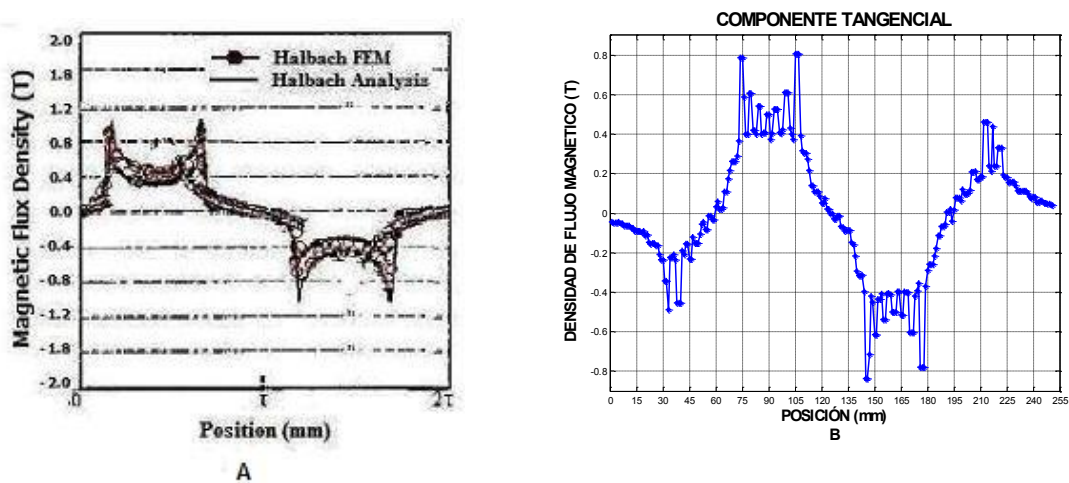


Figura 4.19: Densidad de Flujo Magnético en dirección-Tangencial al movimiento. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado de MSLIP en configuración Halbach.

La **Figura 4.20** muestra los resultados de la componente normal de la densidad de flujo magnético de los dos modelos comparados. Según estos resultados también se observa que la configuración Halbach en este prototipo resulta  $\sqrt{2}$  veces mayor que en los modelos convencionales de MSLIP (tal como también refleja el estudio inicial de los autores Seok et al).

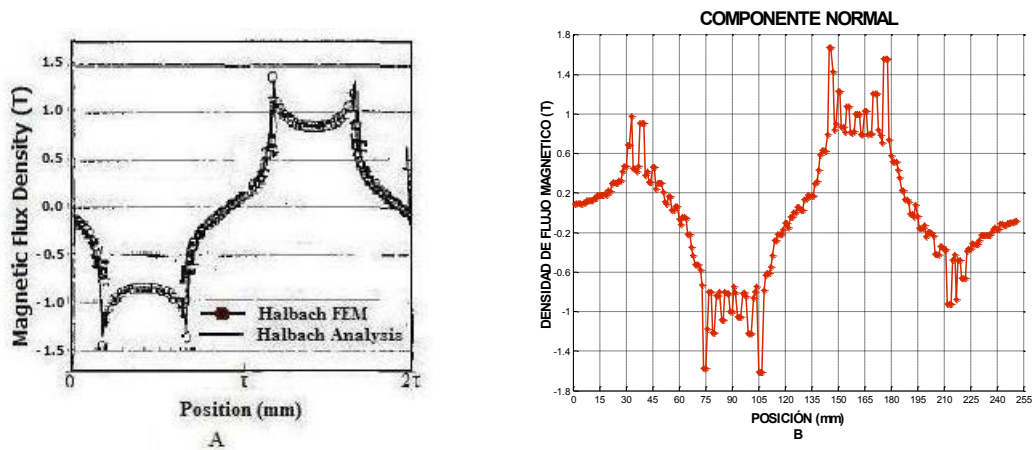


Figura 4.20: Densidad de Flujo Magnético componente-Normal al movimiento. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado de MSLIP-H.

Las **Figura 4.21** y **Figura 4.22** muestran los resultados obtenidos de la densidad de flujo magnético producido por las bobinas del devanado. La **Figura 4.21** muestra la densidad de flujo del devanado trifásico en dirección tangencial al movimiento del deslizador. La **Figura 4.22** muestra la densidad de flujo del devanado trifásico en dirección normal al movimiento del deslizador.

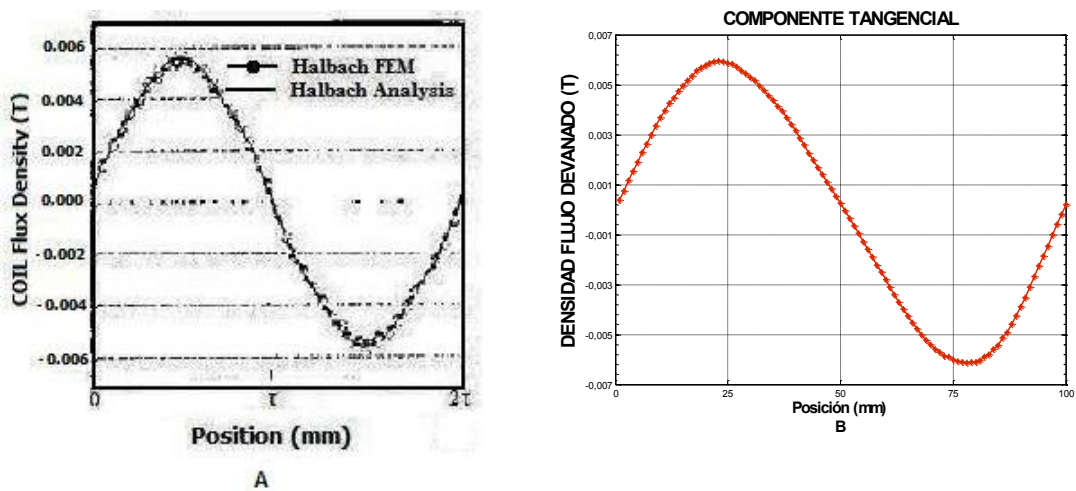


Figura 4.21: Densidad de Flujo componente tangencial producida por devanado trifásico. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado del MSLIP-H.

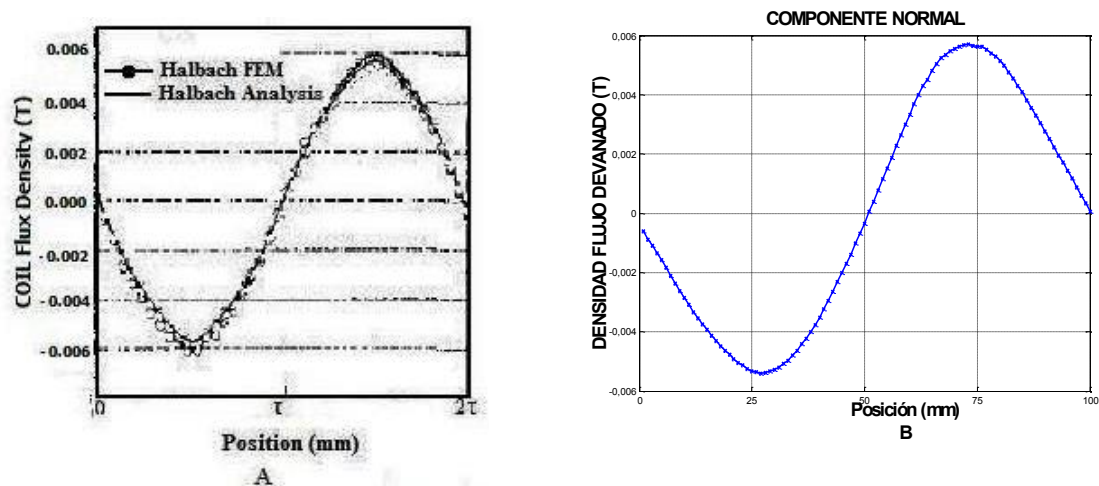


Figura 4.22: Densidad de Flujo componente normal producida por devanado trifásico. A) Prototipo Seok, B) Prototipo validado del MSLIP-H.

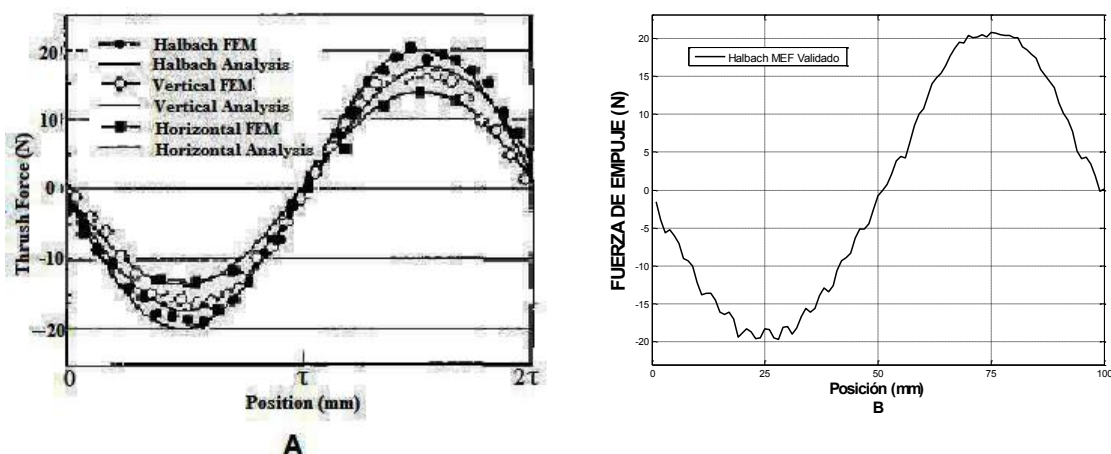


Figura 4.23: Fuerza de Empuje. A) Modelo Seok. B) Prototipo validado de MSLIP-H

Los datos de la fuerza de empuje obtenida en la simulación realizada para validar el modelo se muestran en la **Figura 4.23-B**. Los valores de la fuerza de empuje resultante de la simulación realizada con el modelo desarrollado por el autor de esta tesis son prácticamente los mismos que los mostrados por Seok (**Figura 4.23-A**).

Tras el análisis y correcta comparación de las señales, se concluye la validación del modelo de MSLIP-H desarrollado.

## Referencias

- [1] E. Yoshida K. and I. Weh H. A method of modeling permanent magnets for analytical approach to electrical machinery. *Archiv Für Elektrotechnik* 68(4), pp. 229-239. 1985.
- [2] U. Alder. Automotive handbook. *Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany* 1986.
- [3] J. Zhao, X. Zhang and J. Zhang, "Analysis and study thrust ripple of PMSLM," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference On*, 2008, pp. 3439-3442.
- [4] O. C. Zienkiewicz and Y. K. Cheung, *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics* MacGraw-Hill, 1967.
- [5] M. Ehsani, K. M. Rahman and H. A. Toliyat. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. *Industrial Electronics, IEEE Transactions On* 44(1), pp. 19-27. 1997.
- [6] H. Zhang, D. Huang, D. Dai, P. Guo and F. Lin, "Genetic Algorithm Based Optimization and Simulation of Electric Bus Power System Parameters," pp. 2451-2455, 2012.
- [7] (). *Autobús turístico eléctrico puro LCK6128EV*. [Autobus]. Available: <http://www.zhongtongbus.es/8-electric-buses-b-2.html>.
- [8] T. Heikkilä. Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications-analysis and design. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 2002.
- [9] J. Gieras F. and Z. Piech J., *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems*. Electric Power Engineering Series, 2000.
- [10] M. Donsión P. and Ferro, M., A., F. *Motores Sincronos De Imanes Permanentes* 1990.
- [11] J. Gieras F., Z. Piech J. and B. Tomczuk Z. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems* (Second Edition ed.) 2012 Vol 20.
- [12] S. Jang M., D. You J., S. Lee H., H. Cho W. and W. Jang B. Design and analysis of three types for permanent magnet linear synchronous machine. *Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference On* 1pp. 31-33 vol.1. 2003.



# CAPITULO 5

## 5. MEJORAS DE DISEÑO PROPUESTAS PARA EL MSLIP EN CONFIGURACIÓN HALBACH.

En este capítulo se propone realizar una serie de mejoras sobre el diseño del MSLIP en configuración Halbach (MSLIP-H) realizado en el capítulo anterior que permitirán reducir la fuerza de retención y en consecuencia, el rizado en la fuerza de empuje del motor.

El MSLIP-H en estudio presenta una fuerza de retención debida a la interacción de los imanes permanentes del deslizador con el núcleo ranurado del estator. Utilizando el análisis de elementos finitos, esta investigación estudia básicamente tres métodos de reducción de la fuerza de retención para la topología de imanes Halbach como son, la geometría del ranurado estatórico, el ajuste de la longitud de los imanes permanentes y el ajuste de su inclinación.

Por lo tanto, en este capítulo, y con el objetivo de reducir el rizado sin disminuir la fuerza de empuje del MSLIP-H se analizarán los siguientes métodos:

- Uso de ranuras semicerradas (que se analiza en el apartado 5.1).
- Búsqueda de la adecuada inclinación de los imanes (apartado 5.2).
- Variación de geometría de los imanes permanentes del deslizador (apartado 5.3).

Las conclusiones obtenidas en estos tres apartados se aplican sobre el modelo MSLIP-H de partida obtenido en el capítulo anterior (apartado 5.4).

## 5.1 Análisis de la fuerza de empuje, rizado y vibración en dos modelos de MSLIP con diferente ranurado estatórico.

Se ha explicado anteriormente que el sistema de propulsión de un motor lineal precisa para su transmisión únicamente del vínculo electromagnético entre los dispositivos móviles y fijos, eliminando así el recurso de convertir el movimiento rotativo en lineal. Es ésta una de sus ventajas. Como uno de sus principales inconvenientes, destacar la presencia de fuerzas normales al movimiento del motor o el elevado rizado que presenta la fuerza de empuje. Existen fuerzas indeseadas en el movimiento que se producen por la presencia de armónicos en la forma de onda de la inducción magnética, los cuales a su vez se producen por la presencia de asimetrías en el circuito magnético de la armadura y de la excitación. Como son los denominados efectos de borde, o principalmente por la llamada fuerza de diente (*cogging force*, siglas en inglés). Recordemos que esta fuerza deriva de la interacción entre el deslizador y las ranuras del estator: al paso del imán, la ranura, que tiende a mantener alineadas las líneas de flujo respecto a las de flujo del imán, reacciona generando una fuerza para mantenerse en equilibrio. Esta fuerza o efecto no deseado en el empuje, también se conoce como pulsación de ranura, *cogging* o fuerza de retención (*detent force*, en inglés).

En investigaciones anteriores se ha examinado la técnica de cerrar las ranuras de la armadura el máximo posible, con el fin de reducir el efecto de la fuerza de diente. Los autores [1-7], realizan un buen estudio de esta técnica. Se ha de estudiar el problema de la saturación de los dientes. Además el uso en MSLs con estator de ranura semicerrada de imanes inclinados genera un incremento en la fuerza de empuje del motor lineal [2].

La **Figura 5.1** muestra la comparación de la fuerza de retención en dos modelos de MSLIP con iguales características, que se diferencian por el tipo de ranura estatórica [5]. Se aprecia que en el modelo con estator en ranura abierta (*open slot*) se genera una fuerza de retención hasta 5 veces superior a la del modelo con ranura semicerrada (*semi-closed slot*).



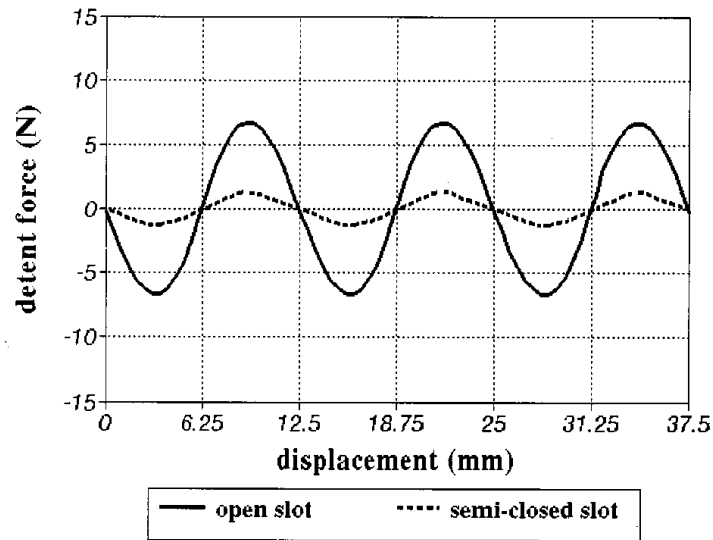


Figura 5.1: Comparación de la fuerza de diente de acuerdo para dos tipos de ranuras del estator [5].

En la primera sección de este apartado se hará una breve descripción del estudio realizado a dos nuevos modelos numéricos de MSLIP, analizando las vibraciones producidas por el modelo 1 identificado como MSLIP-1 con estator de ranura abierta y el MSLIP-2 con estator de ranura semi-cerrada. Ambos modelos numéricos se analizaron inicialmente para el caso de imanes en montaje superficial de polaridad alternada (ver **Figura 5.2**). Posteriormente se mejora el rizado de la señal de empuje obtenida en cada caso mediante la técnica de inclinación de los imanes. Para realizar este estudio, inicialmente se tomaron dos modelos numéricos de MSLIP desarrollados en la UC3M en anteriores investigaciones [8] y que se corresponden con dos topologías distintas de MSLIPs. Cada modelo numérico propuesto es analizado por el método de elementos finitos utilizando el software comercial Flux™.

La **Figura 5.2** muestra la configuración geométrica de los modelos de MSLIPs analizados, con un deslizador compuesto de una placa de acero inoxidable y 4 imanes permanentes de material de tierras raras en disposición de polos opuestos y montaje superficial.

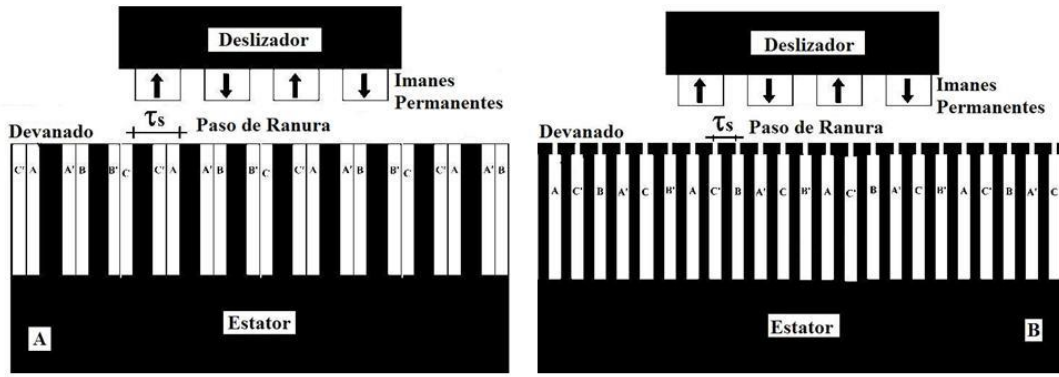


Figura 5.2: Estructura de los dos modelos: MSLIP-1 y MSLIP-2.

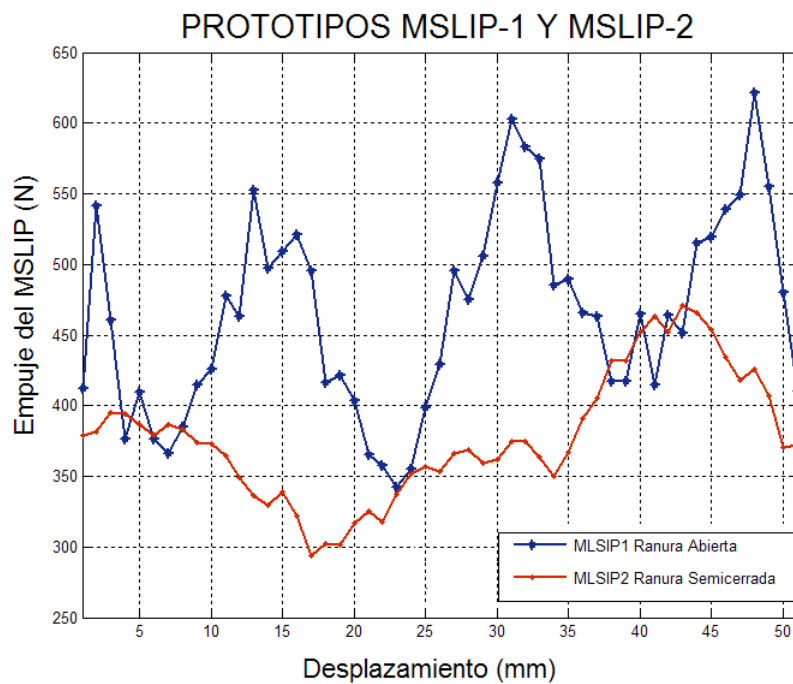


Figura 5.3: Empuje del MSLIP-1 y MSLIP-2 con diferente ranurado.

En el análisis de ambos modelos de MSLIP, se encontraron niveles de vibración altos producidos por el rizado de la fuerza de empuje (**Figura 5.3**); fue entonces necesario buscar una forma de reducirlo.

Es conocido el efecto que la inclinación de los imanes permanentes puede producir en motores c.c. sin escobillas [9], comprobándose que puede reducir el rizado del par producido por la fuerza de diente. También es conocido este efecto sobre MSLIPs [10].

En la literatura técnica existente [9, 12, 13], se consideran algunos métodos de reducción del rizado de la fuerza de empuje, pero no se presentan estudios que analicen

la disminución del rizado sin reducción del empuje. Existen también algunos trabajos que han generado modelos numéricos de motores lineales analizados por el método de elementos finitos para analizar el campo magnético generado durante el funcionamiento [10, 14], o para analizar la magnitud del empuje y [15, 16].

Los autores W. Chu y Z Zhu [17], investigan la efectividad de la inclinación que depende en gran medida de la variación axial o longitudinal del rizado de la fuerza de empuje. En los casos lineal y no-lineal, el par electromagnético y el rizado a plena carga no se pueden eliminar completamente mediante la inclinación. Esto se debe al hecho de que el rizado del par electromagnético, especialmente la generada por la fase, en cada segmento del estator, es diferente debido a la variación axial de la corriente de fase equivalente sobre-excitada. En los casos no-lineales la variación del rizado del par electromagnético se ve agravada aún más por la variación axial de la saturación magnética. Es más, el rizado del par electromagnético así como el de la fuerza a plena carga puede que se incrementen con la inclinación de los imanes, especialmente cuando la fuerza de diente es baja [17].

La fuerza de retención, el rizado y algunos armónicos superiores espaciales se pueden reducir con la ayuda del montaje de los IPs inclinados [18]. Por ello se procedió al estudio del efecto que la inclinación de los imanes del deslizador (respecto a las ranuras del estator) tiene sobre el modelo de MSLIP previamente diseñado. En la segunda sección de este apartado, se varía el ángulo de inclinación de los imanes permanentes, para los dos modelos de ranura, de modo que es posible comparar cual tiene más fuerza de empuje con menor rizado.

### **5.1.1 Análisis del modelo numérico.**

Dentro del análisis del modelo numérico, la fuerza magnética está calculada por el *método tensor de esfuerzos de Maxwell* a partir de la teoría de electromagnetismo para campos estacionarios cuando el deslizador está en sincronismo con el campo magnético estatórico [11]. La solución de los términos de integración para la fuerza magnética de atracción y empuje se resuelve para los tres ejes. Las simulaciones se realizaron en el software comercial de Elementos Finitos Flux™ en 3D.

En el funcionamiento del MSLIP existen picos, a determinadas frecuencias, que distorsionan la estructura del sistema continuamente, generando vibraciones que se transmiten a la estructura. Estas frecuencias de vibración son analizadas por Transformada Rápida de Fourier (FFT). La técnica de la FFT se emplea para convertir una señal en el dominio del tiempo en una señal en el dominio de la frecuencia (análisis espectral). El análisis espectral es posiblemente el método más utilizado para la detección de defectos en sistemas dinámicos y mecánicos.

La frecuencia-propia del sistema es la que se emplea para calcular los niveles de vibración del MSLIP. Cada ciclo producirá pulsos de fluctuaciones de fuerza magnética constante ejercida por el movimiento del deslizador; estos pulsos pueden excitar las frecuencias naturales de los modos de vibración de la estructura del MSLIP aumentando la energía vibratoria.

La **Figura 5.4** muestra la configuración de los imanes utilizada, particularizada para el modelo MSLIP-2 simulado.

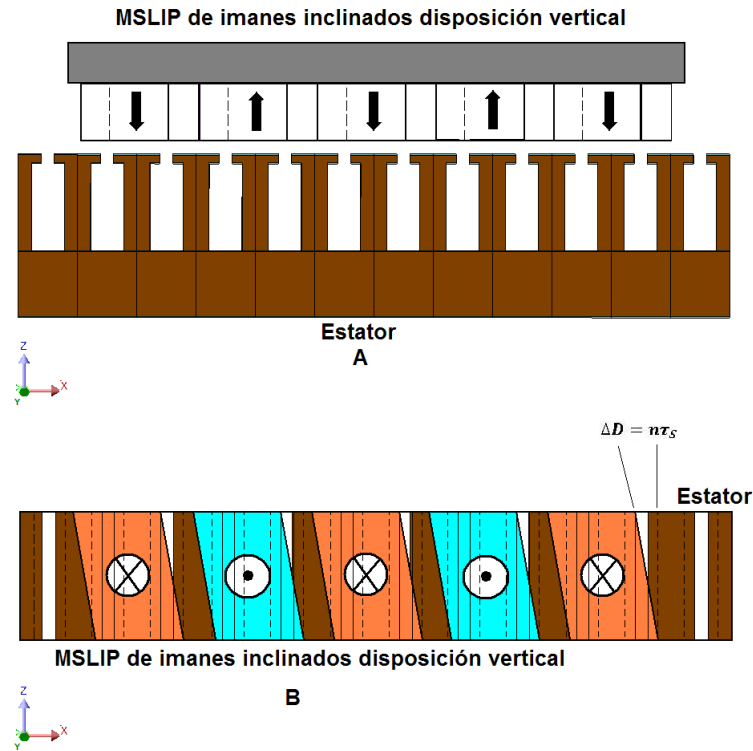


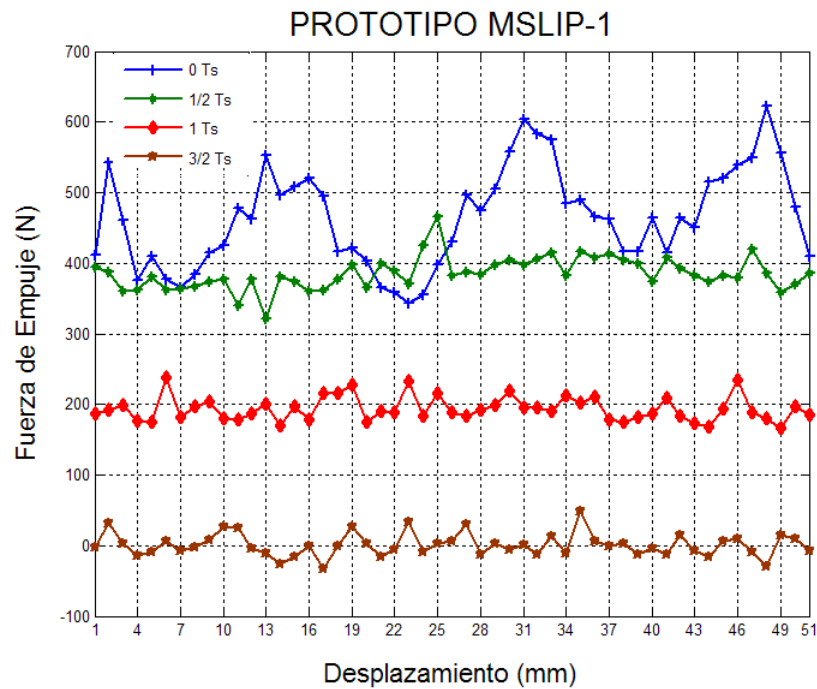
Figura 5.4: Inclinación de los imanes del MSLIP-2. A) Vista frontal. B) Vista superior.

Los ángulos se miden en fracciones de paso de ranura  $\tau_s$ ; ésto consiste en inclinar los imanes respecto del estator un ángulo de acuerdo a la siguiente ecuación:

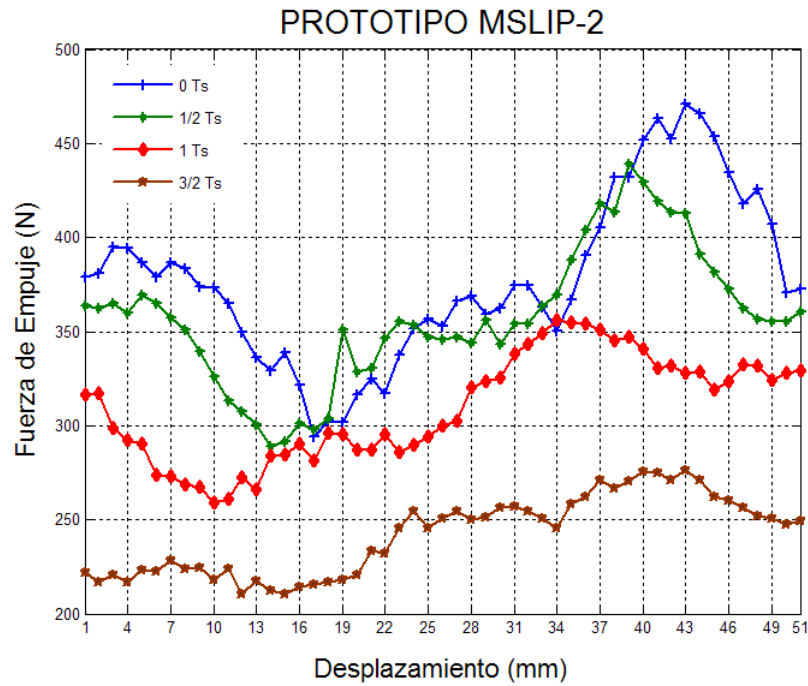
$$\Delta D = n * \tau_s \quad (5.1)$$

Donde  $\Delta D$  es la distancia que se desplaza un extremo del imán sobre la base del deslizador con respecto al estator en la dirección del movimiento, que este caso es sobre el eje  $x$ ; la variable  $n$  es el valor que se aplica al paso de ranura para obtener  $\Delta D$ .

Para realizar esta prueba se utilizan los dos modelos descritos (MSLIP-1 y MSLIP-2) y se aplica la técnica de la variación de la inclinación de los imanes para 10 ángulos diferentes; la **Figura 5.5** muestra las fuerzas de empuje de los dos modelos simulados para tres ángulos de inclinación ( $n=1/2, 1, 3/2$ ), por ser estos los ángulos que resultaron afectar más al rizado y al empuje de los MSLIPS.



**A**



**B**

Figura 5.5: Datos de la fuerza Magnética (N) de los modelos A: MSLIP-1 y B: MSLIP-2 para distintos valores de la inclinación de los imanes.

La variación de la fuerza magnética que se realiza durante un paso de ranura afecta a la estructura del motor; se observa que se generan ondulaciones no periódicas durante el paso y otra serie de ondulaciones que se repiten con el movimiento del deslizador sobre cada paso de ranura del estator. Aplicando un análisis espectral mediante la transformada Rápida de Fourier (FFT) se determinara cual es el ángulo de inclinación que produce menores niveles de vibración en cada topología estudiada. Se empleó el software comercial MATLAB™.

Los resultados de la fuerza de empuje (N) y su rizado (N) obtenidos desde la simulación por MEF se resumen en la **Tabla 5.1**. Los datos se analizan para encontrar la relación óptima entre empuje y rizado para cada uno de los modelos propuestos. El resultado que se muestra para cada ángulo de inclinación, corresponde al máximo valor del promedio de todos los valores obtenidos para ese ángulo. Los valores del rizado de la fuerza de empuje corresponden al valor medio ponderado de los valores obtenidos con el empuje para cada uno de los ángulos analizados [19].

Tabla 5.1. Datos de Fuerza de empuje (N) y Fuerza de rizado (N) en los modelos MSLIP-1 y MSLIP-2 según el ángulo de inclinación.

Número	Angulo de Inclinación $\theta (\tau_1, \tau_2)$	PMLSM-1		PMLSM-2	
		F. Empuje	F. Rizado	F. Empuje	F. Rizado
1	0	460.7	281.9	362.5	185.4
2	1/4	458.4	197.1	358.0	147.7
3	1/3	454.3	200.2	355.6	148.2
4	1/2	439.9	171.2	355.0	142.7
5	2/3	426.2	136.8	351.9	146.9
6	3/4	422.8	147.8	346.6	138.7
7	1	397.0	121.9	343.7	119.0
8	5/4	351.5	129.4	333.4	98.4
9	4/3	334.1	96.6	328.3	94.2
10	3/2	306.3	97.5	322.9	85.1

Se concluye que el valor de  $\Delta D$  que más reduce el rizado es  $\Delta D=3/2\pi$ , y es el mismo para los dos modelos; es también ese valor de  $\Delta D$  el que consigue la mejor relación entre fuerza de empuje y rizado en el MSLIP-2; sin embargo, en ambos casos se produce una reducción en la fuerza de empuje, que es más acusada en el MSLIP-1. Se comprobará el nivel de vibración asociado con cada modelo en el siguiente apartado.

### 5.1.2 Análisis espectral de los pulsos de fuerza mediante la FFT.

Con los datos adquiridos de cada uno de los modelos se calculan las magnitudes de la frecuencia de vibración. Se examina el rizado debido a la variación del empuje por el paso del circuito magnético en cada posición relativa entre el estator y el deslizador en su desplazamiento horizontal en los dos modelos MSLIP-1 (ranura abierta) y MSLIP-2 (ranura semicerrada); se emplea el análisis del rizado de la fuerza de empuje como la medida de la vibración del modelo. Las medidas de vibración obtenidas son periódicas (debido a que el funcionamiento del motor lineal es por intervalos de tiempo que se repiten por la interacción de los imanes con el campo estático); para estas pruebas solo se estudian las magnitudes de vibración propias del sistema en un solo paso de ranura  $\tau_s$ . Esta señal temporal es procesada con la técnica de la transformada rápida de Fourier (FFT); este análisis es también de utilidad para predecir las frecuencias que

pueden causar mayor daño a la estructura de soporte [20, 21]. Los niveles de vibración están definidos por el número de amplitudes relevantes en el análisis espectral; no se consideran aquellas amplitudes que para cada frecuencia no produzcan grandes daños a la estructura en cortos periodos de tiempo.

La **Figura 5.6** muestra los resultados del análisis en frecuencia de las señales de fuerza obtenidas de los modelos MSLIP-1 y MSLIP-2 con  $\Delta D = 0\tau_s$ . En la **Figura 5.6-A** se perciben 17 picos con una magnitud promedio de 2000; el modelo del MSLIP-1 sin inclinación contiene grandes niveles de energía de vibración y demasiada ondulación en comparación con el modelo del MSLIP-2 sin inclinación de la **Figura 5.6-B** que contiene 10 picos y un promedio de amplitud de 500.

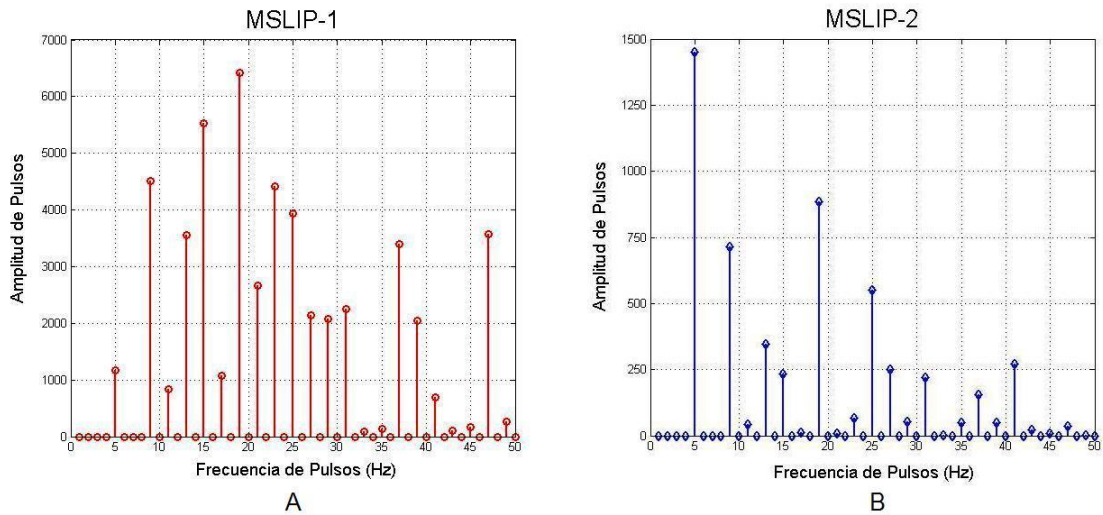


Figura 5.6: Análisis de los modelos A) MSLIP-1 y B) MSLIP-2 con  $\Delta D = 0\tau_s$

El estudio muestra en la **Figura 5.7** los valores de las amplitudes del análisis espectral aplicado al modelo MSLIP-1 con  $\Delta D = \tau_s / 2$  (comparado con el motor sin inclinación). Claramente el modelo con ángulo de  $1/2\tau_s$  presenta pulsos de menor amplitud que el modelo con ángulo  $0\tau_s$ .



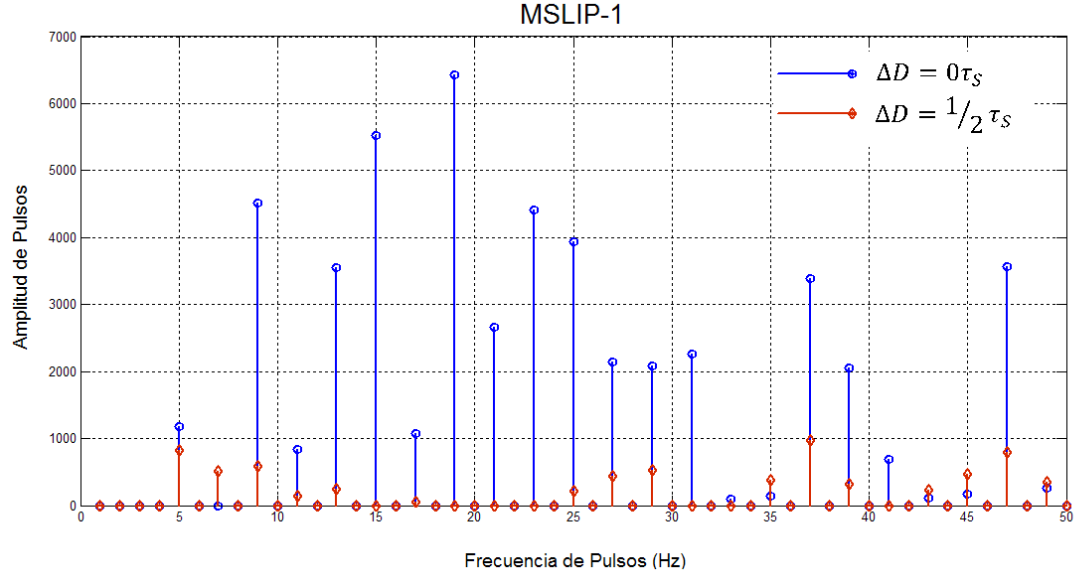


Figura 5.7: Modelo MSLIP-1 con  $\Delta D = 0\tau_s$  y  $\Delta D = \tau_s/2$

La **Figura 5.8** muestra los valores de las amplitudes del análisis espectral aplicado al modelo MSLIP-1 con  $\Delta D = \tau_s$  y  $\Delta D = 3\tau_s/2$ , donde se comprueba una reducción de la amplitud de los pulsos respecto a los mostrados en la **Figura 5.8** a menor ángulo de inclinación. Al igual que se mostraba en la **Tabla 5.1** el mejor ángulo entre el empuje y el rizado del modelo MSLIP-1 se presenta con  $\Delta D = 3\tau_s/2$ .

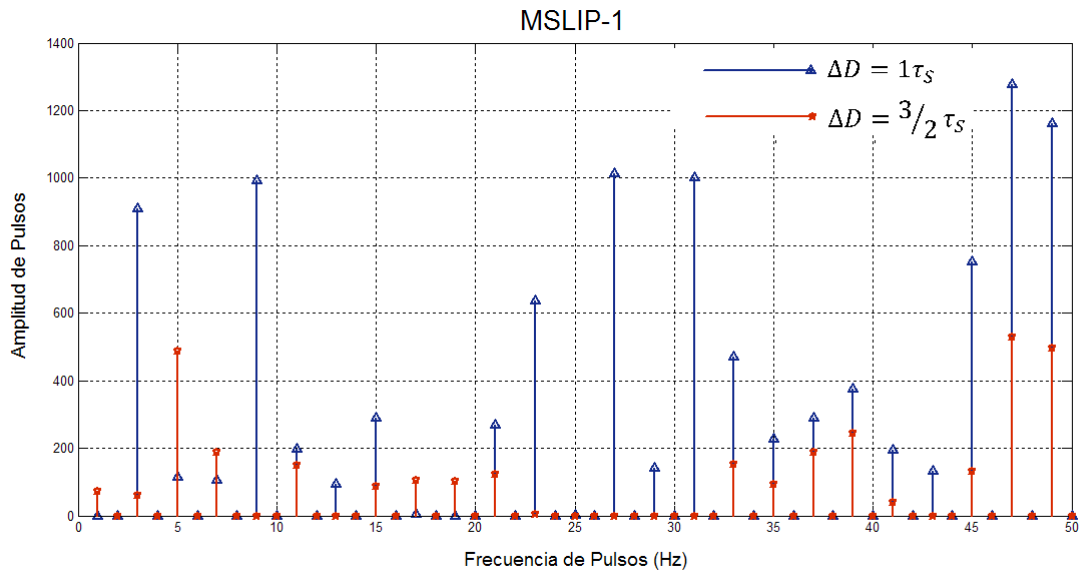


Figura 5.8: MSLIP-1 model con  $\Delta D = 1\tau_s$  y  $\Delta D = 3/2 \tau_s$ .

La siguiente **Figura 5.9** muestra las frecuencias del modelo con el ángulo  $2/3\tau_s$ , aunque sus amplitudes son mayores que  $\Delta D = 1\tau_s$  y  $\Delta D = 3/2\tau_s$ .

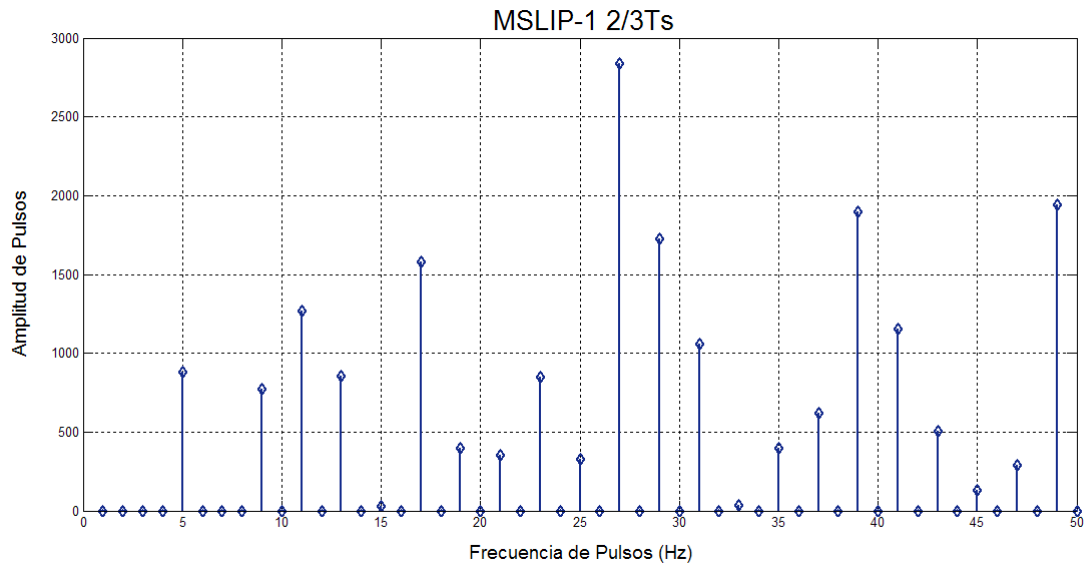


Figura 5.9: Modelo MSLIP-1 con  $\Delta D = 2/3\tau_s$ .

Se realiza el mismo estudio para el modelo MSLIP-2. Los resultados del modelo MSLIP-2 de nuevo presentan a  $\Delta D = 3/2\tau_s$ , como la mejor opción (**Figura 5.10**). Además, en comparación con el mejor modelo del MSLIP-1 inclinado, el análisis espectral de nuevo corrobora que el MSLIP-2 con  $\Delta D = 3/2\tau_s$  presenta menor nivel de vibración.

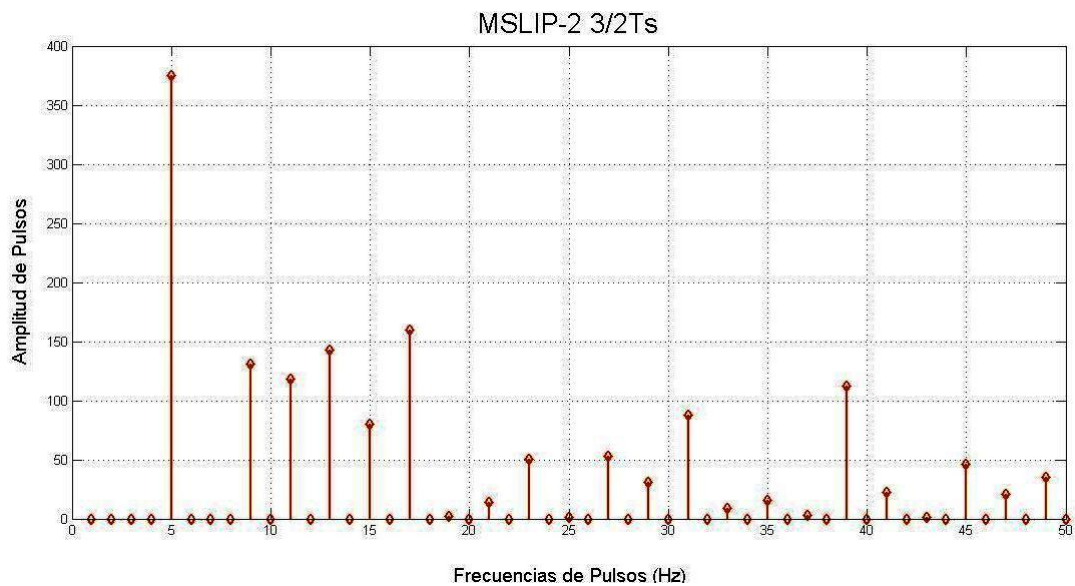


Figura 5.10: Modelo MSLIP-2 con  $\Delta D = 3/2\tau_s$ .

### 5.1.3 Conclusiones.

Las conclusiones observadas en este primer estudio mediante el análisis de vibraciones para dos modelos de MSLIPs de polos opuestos son:

- Para el modelo MSLIP-1 el ángulo de inclinación que ofrece el mayor empuje corresponde a  $\Delta D = 3/2 \tau_s$ ; sin embargo, este modelo tiene altos niveles de energía vibracional, por lo que puede sufrir daños estructurales a corto plazo.
- Para el MSLIP-2 el ángulo de inclinación que ofrece mejor empuje así como la mejor relación entre la vibración y empuje corresponde a  $\Delta D = 3/2 \tau_s$ ; tiene bajos niveles de vibración en comparación con el modelo MSLIP-1.
- En general la densidad de flujo y la fuerza de empuje del MSLIP con estator de ranura semicerrada tienen menor distorsión armónica que con ranura abierta. En esta tesis empleará ranura semicerrada dado los resultados obtenidos en los modelos simulados.

### 5.1.4 Aplicación del tipo de ranura seleccionado sobre el MSLIP-H de partida.

Se aplica el estudio realizado en 5.1.3 al modelo transformado en lineal MSLIP-H descrito en el capítulo 4 y que en adelante se denominara como motor LIN45; se denotará como motor LIN45\_EST para los resultados obtenidos en régimen estático y LIN45\_TRA para las simulaciones en régimen dinámico.

La **Figura 5.11** muestra la fuerza de diente del modelo LIN45\_EST con las dos topologías de ranura estatórica; la línea roja representa el modelo con ranura abierta y la azul corresponde al modelo simulado con ranura semi-cerrada.

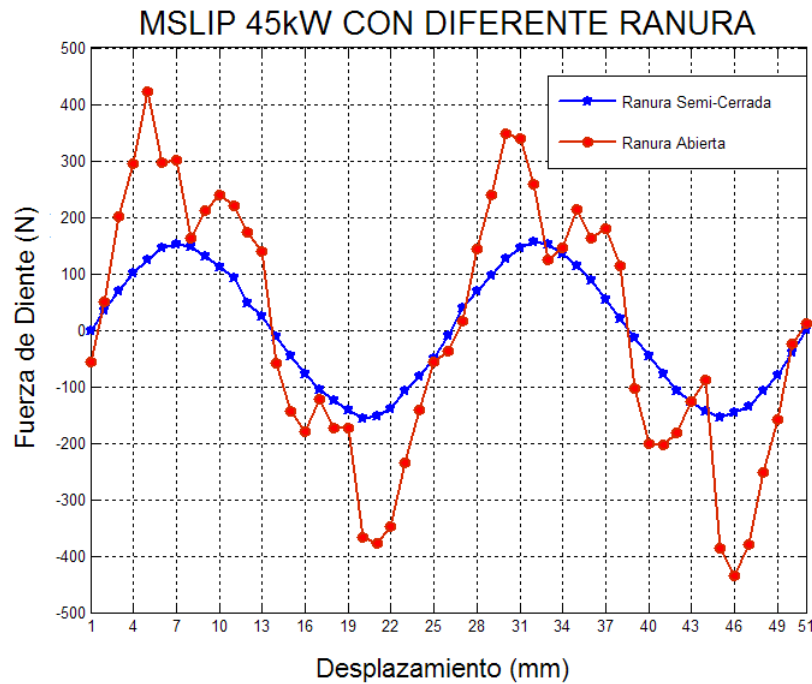


Figura 5.11: Comparación de la Fuerza de diente de acuerdo a la forma del ranurado para los modelos simulados LIN45\_EST.

Se puede observar que la amplitud de la señal de fuerza de diente (o de retención) del modelo con ranura abierta supera los 300 N en promedio y en cambio la señal de fuerza del modelo con ranura semi-cerrada es menor (aproximadamente 100 N), mostrando que efectivamente la fuerza de diente resulta mejor en los motores con armadura de ranura semi-cerrada.

Se comprueba que la fuerza de diente aparece por la interacción de los imanes permanentes y los dientes de la armadura, aumentando la reactancia de dispersión del motor y reduciéndose su eficiencia.

Existen también otras técnicas que persiguen reducir la fuerza de retención aumentando el espesor del entrehierro [6, 22-26]; con ello, se reduce notablemente la fuerza de empuje y por consiguiente la eficiencia del motor (como se verá en el apartado 5.3). Esta técnica resulta más efectiva cuando se trabaja con estator de ranura semicerrada y una elevada densidad de corriente por el devanado estatórico.

Examinaremos antes otra de las técnicas empleadas para la reducción de la fuerza de retención en los MSLIPs.

## 5.2 Técnica de reducción de la Fuerza de Retención a partir de una adecuada relación entre la longitud del imán y el paso de ranura.

En este apartado se emplea en el diseño una relación entre el ancho de imán y número de dientes de la armadura que busca reducir el rizado sin que el empuje se vea afectado; además se emplea un ranurado semi-cerrado en el núcleo del estator.

La fuerza de retención, aumenta proporcionalmente a la reducción del espesor de entrehierro; el ciclo se repite de acuerdo a la relación  $l/\tau_r$ , donde  $l$ , es la longitud de cada imán en el deslizador, y  $\tau_r$  es el paso de ranura. La relación para reducir la fuerza de retención en un MSLIP-H se logra obteniendo un valor mínimo de esta fuerza cuando la relación  $l/\tau_r$  es de 1.65, 2.12, 2.59, 3.06 [27]. Esta relación se obtiene siguiendo la siguiente ecuación 5.2:

$$l/\tau_r = 1.18 + 0.47n \quad (5.2)$$

Donde  $n$  es un número entero.

El diseño inicial del MSLIP-H de partida tiene la siguiente relación de Ancho de Imán / paso de ranura:

$$l = 62.31 \text{ mm}, \tau_r = 20.77 \text{ mm} \text{ por lo tanto la relación es } l/\tau_r = 3$$

De acuerdo a la Ecuación 5.2, se encuentra el valor de  $n$  más próximo a 3 para comprobar la efectividad de la técnica de reducción de la fuerza de diente en el modelo; este valor corresponde al  $n = 4$ , para el que obtenemos la siguiente relación:

$$l/\tau_r = 1.18 + 0.47 * (4) = 3.06 \quad (5.3)$$

Esta relación es aplicada al modelo inicial del MSLIP-H, construyéndose un nuevo modelo que se ha denominado TYPN5AG.

Las siguiente **Tabla 5.2** muestra los parámetros de las geometrías de los dos modelos comparados, el modelo LIN45\_TRA y el modelo TYPN5AG. Ambos prototipos son motores lineales síncronos con imanes permanentes en configuración Halbach, sin inclinación de los imanes, con estator ranurado y ranura semi-cerrada, 5 mm de entrehierro, devanado trifásico concentrado y 4 polos. Las condiciones de la simulación son también equivalentes, tomándose una distancia de desplazamiento a un paso de ranura, igual cantidad de muestras para el cálculo de la fuerza de diente y en estado estático sin influencia de la corriente por el devanado.

Tabla 5.2: Parámetros geométricos los dos modelos comparados del MSLIP-H

MODELO			LIN45TRA	TYPN5AG0T
Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor	
Longitud Imán	$l$	mm	62.31	63.56
Paso de Ranura	$\tau_r$	mm	20.77	20.77
Relación	$l / \tau_r$		3	3.06
Corriente	$I$	A	71.4	71.4
Densidad de Corriente	$J$	A/mm <sup>2</sup>	0.476	0.476
Velocidad sincronismo	$v_s$	m/s	10	10
Paso polar	$\tau_p$	mm	124.62	124.62
Entrehierro	$AG$	mm	5	5
Fuerza Empuje	$Fe$	kN	2,297	1,978
Fuerza Normal	$Fn$	kN	11,772	9,489
Fuerza Rizado	$Fr$	kN	0,735	0,479
Rizado (Ripple)	$rp$		0,303	0.215

### 5.2.1 Fuerza de diente.

La **Figura 5.12** muestra el resultado de la fuerza de diente de los dos modelos, LIN45\_EST y TYPN5AG. La fuerza de diente se comporta como una onda sinusoidal tomada en estado estático, representándose durante la simulación un ciclo completo de

la misma; los resultados resultan cíclicos con cada paso de ranura. Se aprecia una disminución de la fuerza de diente respecto al diseño de relación mejorada (TYPN5AG), cuyos máximo y mínimo se encuentran en 145N y -160N para el modelo LIN45\_EST y 105N y -100N para el TYPN5AG; esto se traduce en un aumento de la efectividad en la maquina al disminuir la ondulación de la fuerza de diente un 31.66% sobre el valor medio de fuerza del motor LIN45\_EST. Para lograr esta reducción fue necesario modificar la geometría inicial hasta obtener los valores adecuados de ancho de imán ( $l=63.5562$  mm) y paso de ranura ( $\tau_r = 20.77$  mm).

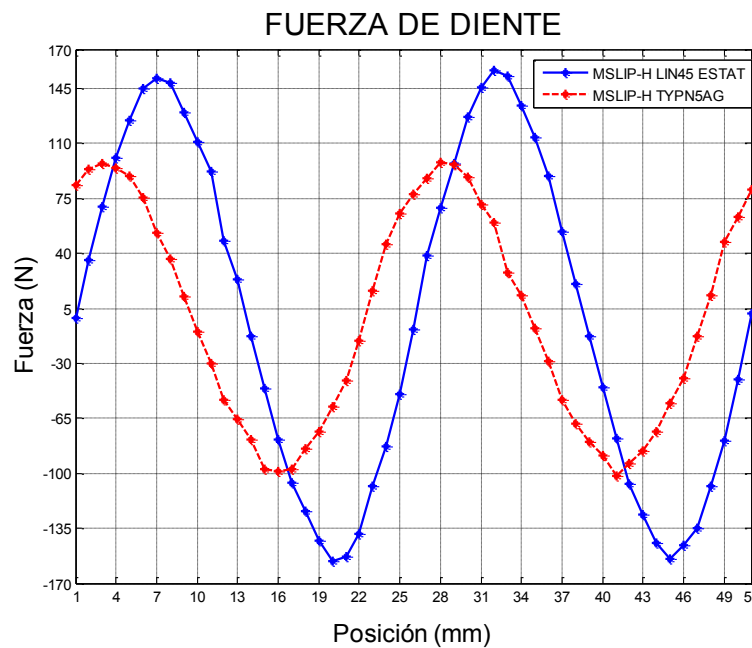


Figura 5.12: Fuerza de Diente modelos LIN45\_EST y TYPN5AG.

### 5.2.2 Fuerzas en régimen dinámico. Fuerzas de Propulsión y Fuerzas Normal.

El conocimiento exacto de la distribución del campo magnético, la fuerza de empuje y el cálculo de la fuerza normal en motores síncronos lineales de imanes permanentes son esenciales para evaluar el rendimiento y el diseño de los motores.

Las fuerzas tangenciales son las fuerzas correspondientes a las fuerzas de empuje o propulsión para un motor lineal de imanes permanentes. En estado dinámico o régimen

permanente el programa de simulación FLUX® permite realizar los cálculos mediante el método de elementos finitos y muestra el resultado para los dos modelos comparados. En este estudio, se muestra las fuerzas correspondientes al prototipo de referencia LIN45\_TRA.

La **Figura 5.13** muestra la fuerza tangencial del prototipo aplicado al deslizador conformado por los imanes permanentes en disposición Halbach. Esta fuerza tiene un promedio de 2.2 kN medido durante el tiempo que transcurre mientras el deslizador recorre un paso polar del estator.

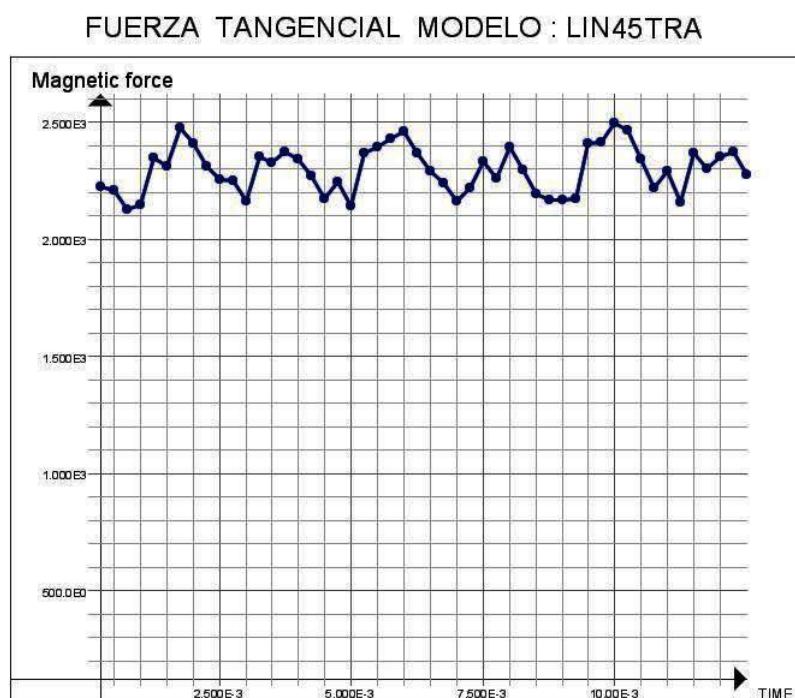


Figura 5.13: Fuerza Tangencial del modelo LIN45\_TRA.

La **Figura 5.14** muestra la fuerza normal de atracción del modelo inicial (modelo de partida sin modificación geométrica para la reducción de la fuerza de diente); el valor es significativamente más alto que la fuerza tangencial (11.8 kN de promedio).

El rizado de la fuerza de empuje o fuerza tangencial es de 0.303 equivalentes a 735.4N, que representa un 6.23% de la fuerza de empuje; este valor es significativamente alto y muy perjudicial para la estructura del MSLIP.



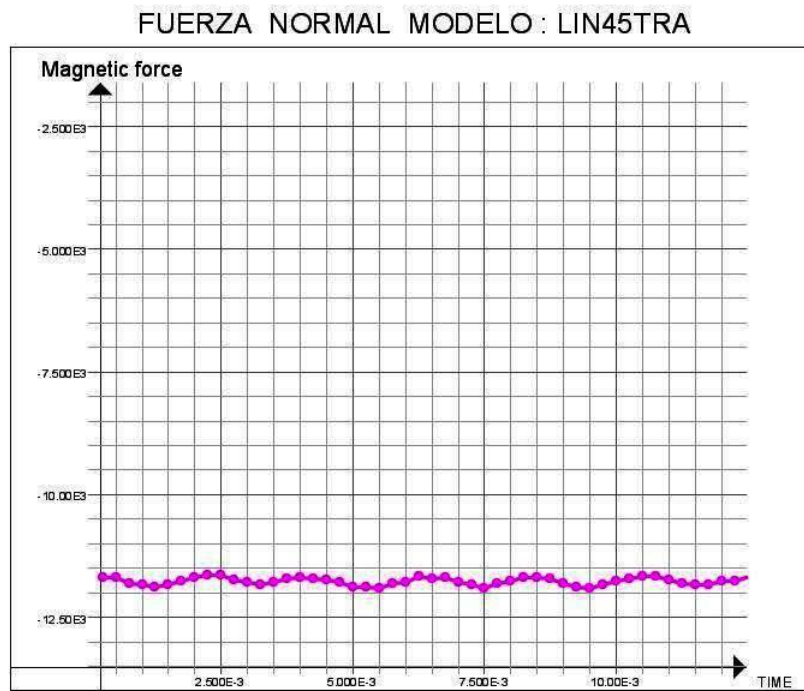


Figura 5.14: Fuerza Normal Modelo LIN45TRA.

La fuerza tangencial que presenta el modelo TYPN5AG (**Figura 5.15**) no presenta una mejora considerable respecto a la del LIN45\_TRA; sin embargo (**Figura 5.16**) se puede notar una reducción considerable en la fuerza de atracción (de 11.8 a 8.5 kN). Esta reducción es debida a los cambios en la relación geométrica de ancho de imán y paso de ranura.

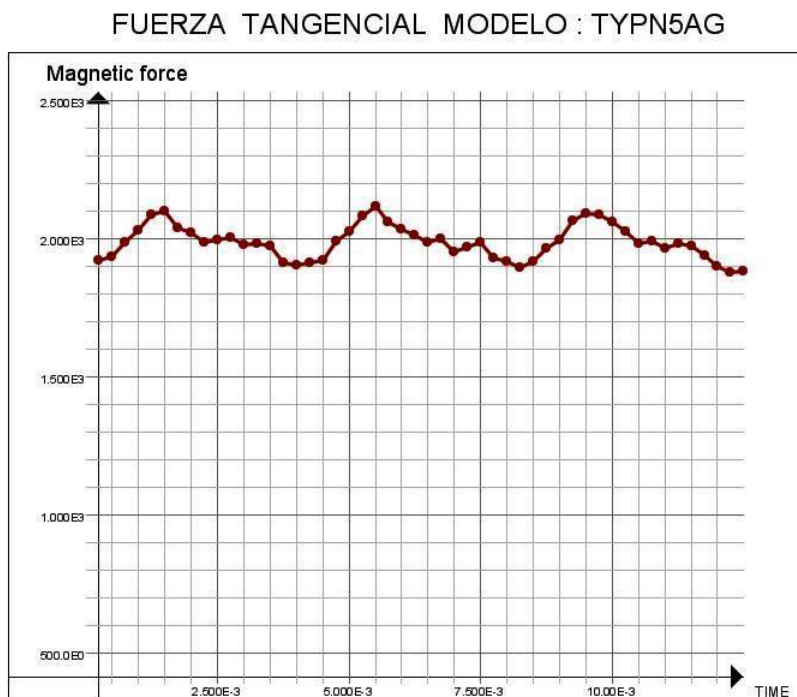


Figura 5.15: Fuerza tangencial del modelo TYPN5AG.

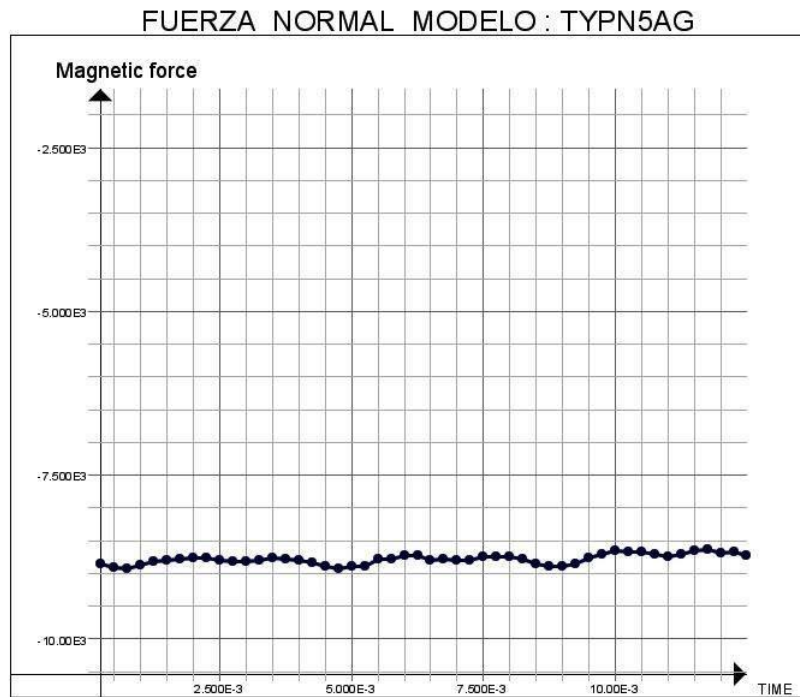


Figura 5.16: Fuerza Normal modelo TYPN5AG.

El rizado de la fuerza de empuje o fuerza tangencial es de 0.215 equivalente a 479.62 N; este valor se considera más reducido y por consiguiente no afecta la estabilidad y consistencia de la estructura del MSLIP.

A continuación se muestra el análisis de FFT de las dos señales de fuerza de los dos modelos comparados, el modelo LIN45TRA (**Figura 5.17**) y el TYPN5AG (**Figura 5.18**).

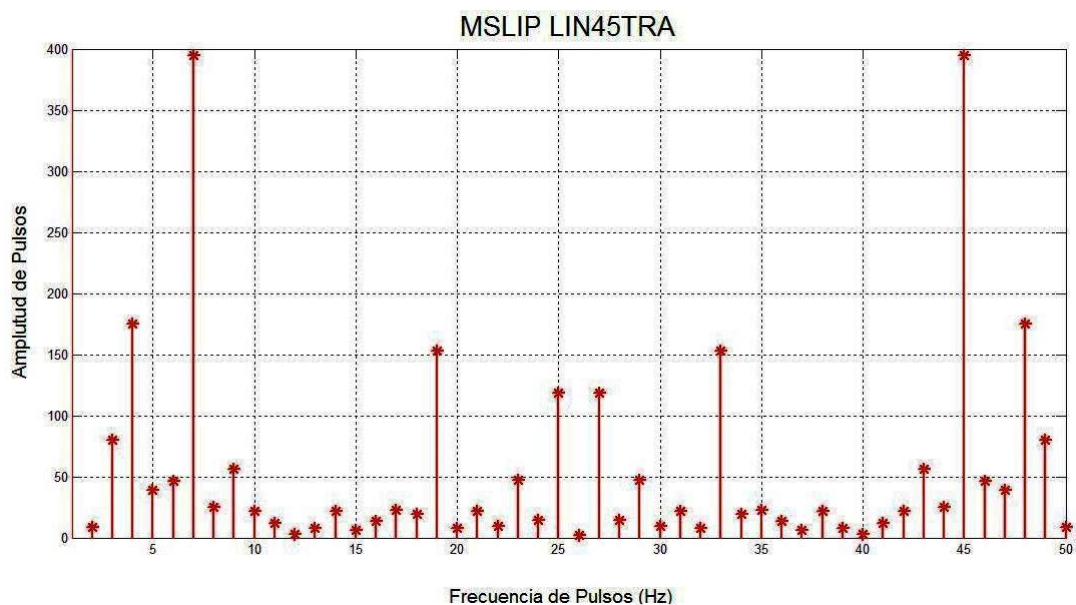


Figura 5.17: Pulsos en Frecuencia del prototipo LIN45\_TRA.

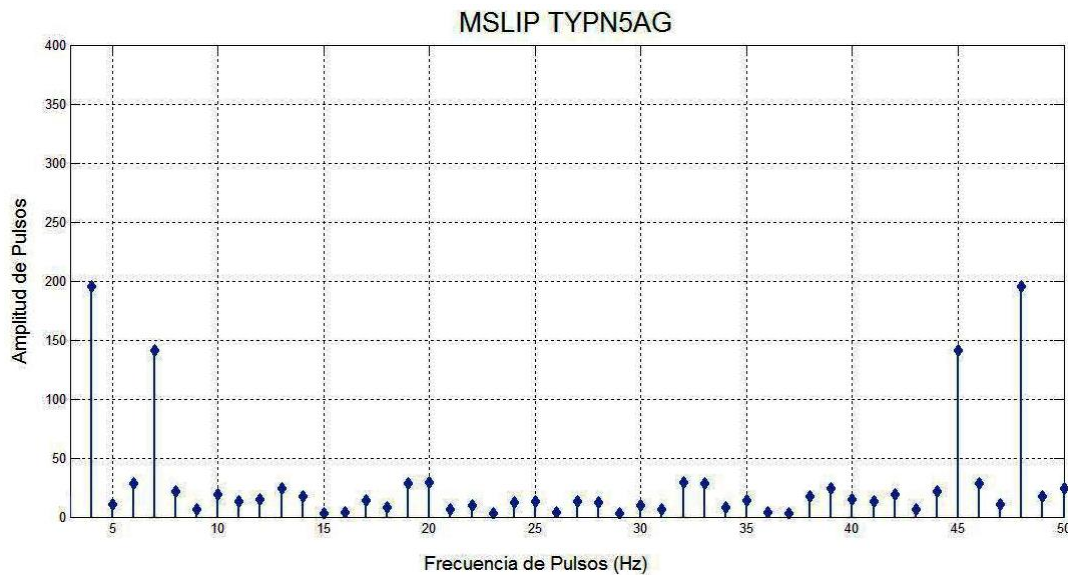


Figura 5.18: Pulsos de Frecuencia del prototipo TYPN5AG.

Se observa que este prototipo TYPN5AG tiene pulsos de frecuencia de menor amplitud, no perjudiciales para la estructura del motor. Se destaca en este estudio que con la técnica de selección de la relación de ancho de *imán – paso ranura* se obtiene una reducción de la fuerza de retención. Sin embargo esta técnica no mejora de forma significativa la relación de Fuerza de Empuje y Fuerza de Atracción; la fuerza de atracción sigue siendo muy superior (más de cuatro veces) a la fuerza de empuje, causando dificultad para el arranque y funcionamiento del motor.

### 5.3 Efecto de la inclinación de los imanes sobre el MSLIP-H de partida.

En este apartado se propone una técnica combinada de inclinar los imanes permanentes desplazando estos una distancia óptima para la configuración Halbach sobre un deslizador de dimensiones optimizadas. Recordemos que el MSLIP-H es un motor que puede dar valores de la fuerza de empuje muy elevados; la adecuada inclinación de los imanes hará que se reduzca el rizado; de la combinación Halbach + inclinación de los imanes propuesta surge un motor apropiado para aplicaciones de transporte. En el diseño propuesto se modifica la geometría de los imanes del deslizador inclinándolos un determinado ángulo, que es función del paso de ranura. Recordemos que existen muy pocos estudios que reflejen la reducción de la fuerza de retención de los MSLIP-H de imanes inclinados ([27] y [31]) y ninguno de ellos estudia este efecto sobre motores de espesor de entrehierro elevado.

Se realizará un modelo numérico del MSLIP-H con ranura semicerrada de acuerdo a la geometría mostrada en la **Figura 5.19**.

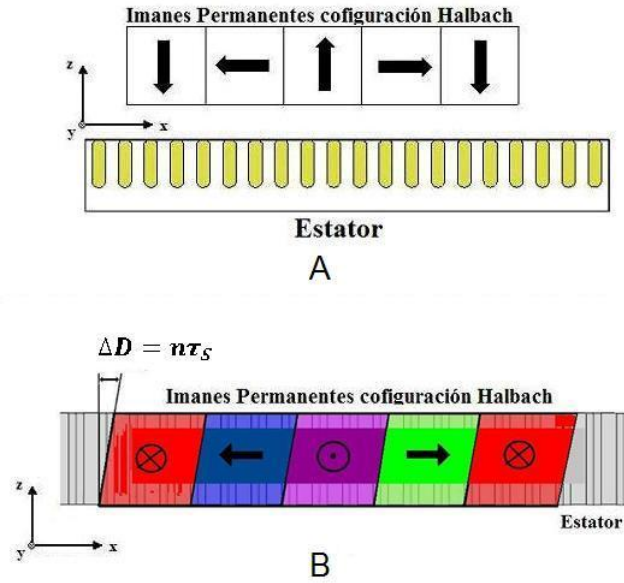


Figura 5.19: Inclínación de los imanes del MSLIP-H. A) Vista frontal. B) Vista superior.

De nuevo los ángulos se miden en fracciones de paso de ranura  $\tau_s$ ; ésto consiste en inclinar los imanes respecto del estator un ángulo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\Delta D_H = n * \tau_s \quad (5.4)$$

Donde  $\Delta D_H$  es la distancia que se desplaza un extremo del imán sobre la base del deslizador con respecto al estator en la misma dirección del movimiento, que este caso es sobre el eje  $x$ , la variable  $n$  es el valor que se aplica al paso de ranura para obtener  $\Delta D_H$ .

En la **Figura 5.20** se presenta el modelo del MSLIP-H particularizado para una inclinación correspondiente a un paso de ranura; la **Figura 5.21** muestra la vista de planta del modelo para mejor apreciación de la inclinación de los imanes.

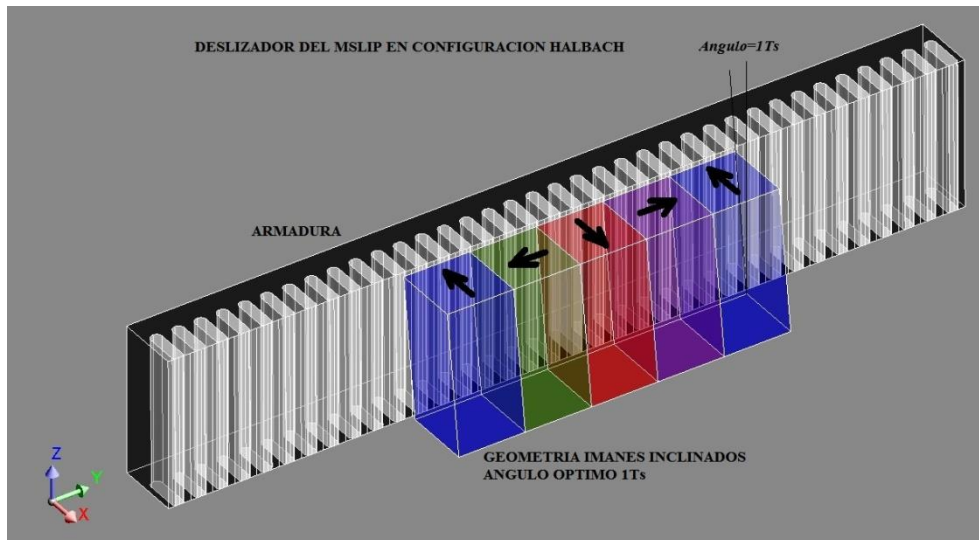


Figura 5.20: MSLIP con imanes en configuración Halbach inclinado  $\Delta D = 1\tau_s$ .

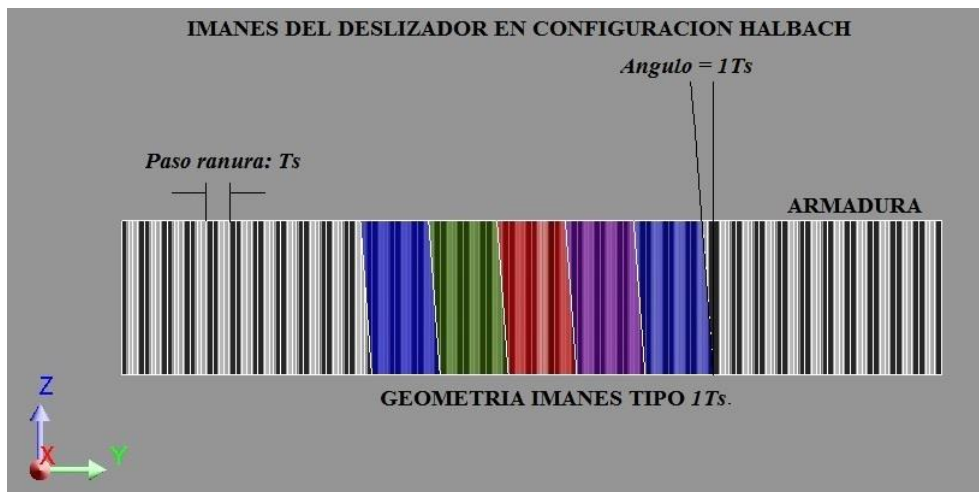


Figura 5.21: MSLIP en configuración Halbach con Imanes inclinados, vista de planta.

La importancia de resolver o minimizar todos los efectos anteriormente mencionados exige la realización de un estudio electromagnético, estático y dinámico del MSLIP-H.

Para garantizar un buen diseño electromagnético se debe calcular la distribución de campo magnético en toda el área activa o geometría del motor. Este cálculo permite optimizar los parámetros geométricos y dimensionales del motor conociendo las zonas que presentan una densidad de campo magnético mayor o más concentrado con el fin de evitar saturación magnética, flujos de dispersión, zonas con incremento de temperatura, etc.

Se ha comprobado en anteriores apartados que la técnica de inclinar los imanes inclinados puede dar resultados óptimos para la reducción de la fuerza de diente y en consecuencia, del rizado; sin embargo, en algunos casos, el inclinar los imanes varía las fuerzas de empuje y fuerzas normales del motor. Por ello, se van a realizar diferentes análisis en régimen dinámico, para motores con distinto valor de entrehierro y para varios ángulos de inclinación de los imanes. Recordemos que no se puede suponer de partida en el estudio que el entrehierro es constante, ya que el vehículo funciona con apoyo de ruedas: esto puede generar ciertas variaciones en la distancia del deslizador y el carril-guía que conducen inevitablemente a variaciones del espesor del entrehierro y a vibraciones irregulares asociadas a la elasticidad del vehículo. Sin embargo y habitualmente, para la simplificación de este problema, se supone que la longitud del entrehierro es constante.

Para este estudio se incrementa la intensidad de corriente a  $3 \text{ A/mm}^2$  para lograr los valores de fuerza y flujo deseados. Es este un valor habitualmente empleado en motores lineales [28]. Los resultados son tomados de las simulaciones en régimen dinámico.

La siguiente **Tabla 5.3** muestra el resultado de la fuerza de empuje y rizado de la misma, así como la fuerza normal, para cada prototipo simulado, para diversos espesores de entrehierro (5-30 mm) y distintos ángulos de inclinación de los imanes del deslizador. Se ha de destacar que cada una de las 30 simulaciones realizadas lleva un tiempo de procesamiento de aproximadamente 30 horas. Se representan las *Componentes-X* (Fuerza normal) e *Y* (Fuerza de empuje) de la fuerza magnética, así como el rizado que presenta la fuerza de empuje; éste se midió como la media ponderada de diferencia entre los máximos y mínimos de la fuerza de empuje. La última columna de la **Tabla 5.3** representa el ratio fuerza de empuje respecto al rizado de la misma; un elevado ratio representa pues, para cada motor, un mayor empuje con menor rizado. Se puede observar la variación de las fuerzas electromagnéticas con la variación de entrehierro y la inclinación de los imanes; evidentemente para el caso del modelo con entrehierro 5 mm, tanto la fuerza de empuje como la fuerza normal son mayores que las que se obtienen con entrehierros mayores.

Tabla 5.3: MSLIP-H para varios valores de entrehierro modelado con varios ángulos de inclinación.

Entrehierro (mm)	Ángulo de inclinación respecto a $\tau_s$	Componente "x" de Fza. Normal (kN)	Componente "y" de Fza. de Empuje (kN)	Rizado de la Fza. Empuje (kN)	% Rizado	Fe/ Rizado
5	"0"	11,44	10,57	0,75	7,07	14,14
	"1/2"	10,38	11,02	0,79	7,21	13,86
	"3/4"	10,92	10,71	0,90	8,41	11,89
	"1"	11,47	10,41	0,78	7,48	13,38
	<b>"5/4"</b>	12,41	10,77	0,65	6,02	<b>16,61</b>
	"3/2"	12,40	9,83	0,66	6,70	14,92
10	"0"	6,76	10,13	0,61	6,06	16,49
	"1/2"	7,61	9,82	0,55	5,63	17,77
	"3/4"	6,98	9,90	0,61	6,20	16,12
	<b>"1"</b>	8,88	9,50	0,48	5,07	<b>19,71</b>
	"5/4"	9,07	9,54	0,57	5,99	16,69
	"3/2"	9,91	8,78	0,46	5,22	19,17
15	"0"	4,81	8,94	0,45	5,05	19,80
	"1/2"	5,83	8,69	0,40	4,64	21,54
	<b>"3/4"</b>	6,29	8,74	0,40	4,54	<b>22,02</b>
	"1"	6,81	8,37	0,46	5,52	18,12
	"5/4"	6,95	8,49	0,42	4,99	20,03
	"3/2"	7,25	7,65	0,48	6,30	15,86
20	"0"	4,18	8,51	0,38	4,50	22,23
	<b>"1/2"</b>	5,21	8,29	0,33	3,95	<b>25,33</b>
	"3/4"	4,74	7,74	0,41	5,24	19,10
	"1"	5,14	7,51	0,33	4,45	22,45
	"5/4"	5,63	7,24	0,34	4,67	21,40
	"3/2"	6,04	6,95	0,32	4,55	21,98
30	<b>"0"</b>	1,50	6,21	0,19	3,04	<b>32,88</b>
	"1/2"	2,24	6,18	0,26	4,13	24,21
	"3/4"	2,57	6,04	0,25	4,18	23,95
	"1"	2,90	5,88	0,20	3,46	28,92
	"5/4"	3,22	5,70	0,23	3,95	25,31
	"3/2"	3,52	5,50	0,21	3,85	25,96

Sin embargo analizando los valores de la **Tabla 5.3**, para cada valor de entrehierro, se evidencia claramente una notable variación de la fuerza de propulsión (Componente Y de la fuerza) cuando se realiza la inclinación de los imanes. Para cada valor de entrehierro el motor sin inclinación tiene máximo empuje. Para ningún motor y ninguna inclinación el rizado de la fuerza de empuje es inferior al 3%. Existe un valor de la inclinación que ofrece la mejor relación Empuje vs Rizado y que es diferente para cada entrehierro; es de resaltar que se está alimentando cada motor con la misma potencia de entrada y que las simulaciones se hacen a la misma velocidad lineal del deslizador.

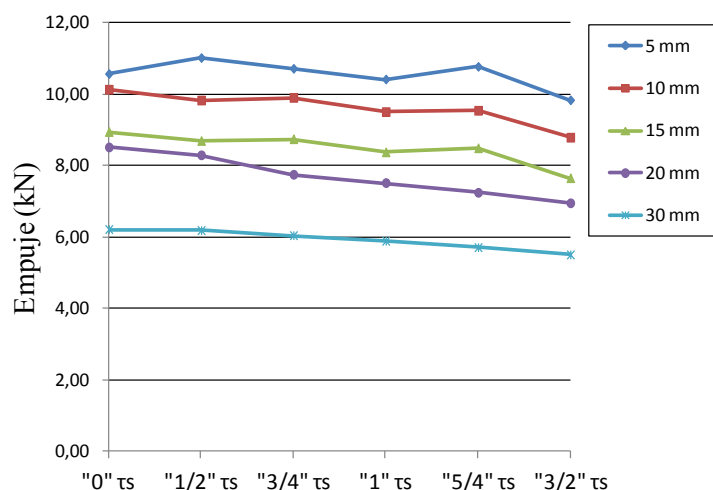


Figura 5.22: Fuerza de empuje del MSLIP-H con Imanes inclinados ( $0-3/2 \tau_s$ ) para distintos entrehierros.

Las posibles combinaciones realizadas para analizar los modelos se muestran en la siguiente **Tabla 5.4**; se ha marcado el ángulo de inclinación que para cada entrehierro cumple con la condición deseada de tener mayor fuerza de propulsión a menor nivel de vibración o rizado.

Tabla 5.4: Simulaciones realizadas del MSLIP-H .Mejor modelo de acuerdo al ratio Fe/Rizado.

LONGITUD DEL ENTREHIERRO (mm)	INCLINACIÓN DE IMANES CON RESPECTO A PASO DE RANURA					
	$0\tau_s$	$1/2 \tau_s$	$3/4\tau_s$	$\tau_s$	$5/4 \tau_s$	$3/2 \tau_s$
5	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓
10	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓
15	✓	✓	✓✓	✓	✓	✓
20	✓	✓✓	✓	✓	✓	✓
30	✓✓	✓	✓	✓	✓	✓

Se comprueba (**Figura 5.23**) que con el incremento del espesor de entrehierro, la inclinación óptima de los imanes decrece; estos resultados son coherentes con los publicados para un MSLIP por In-Soung en [30].



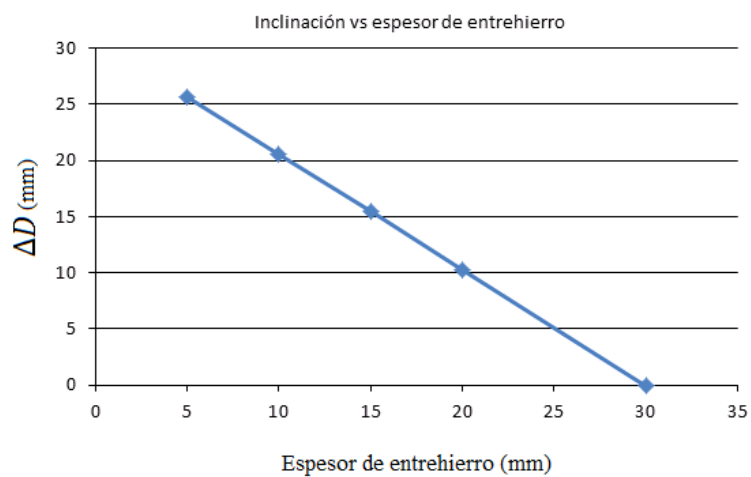


Figura 5.23: Inclinación de los imanes óptima en el MSLIP-H para distintos entrehierros

En la siguiente **Figura 5.24** se representa la densidad de flujo medida en el entrehierro para el MSLIP-H con longitud de 15 mm de entrehierro. Se alcanza un valor máximo de 1.40 T.

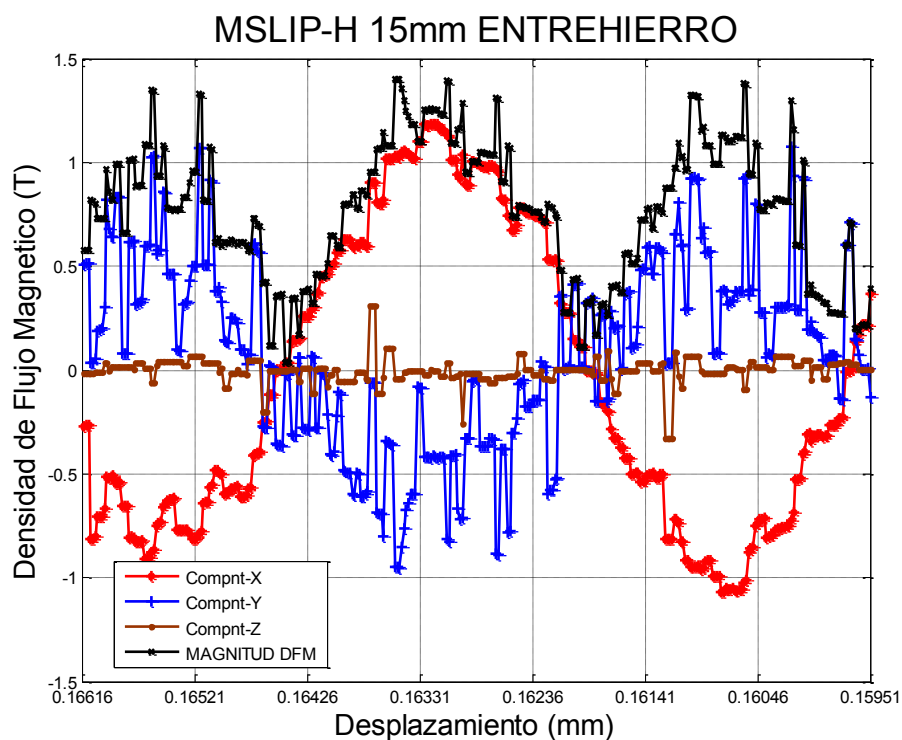


Figura 5.24: Densidad de flujo para el MSLIP-H medido en el entrehierro de longitud 15 mm.

### 5.3.1 MSLIP como sistema de propulsión en una aplicación de transporte rodado.

En el apartado 4.1.1 del capítulo anterior, se resumió el cálculo de las fuerzas necesarias para propulsar una masa. En él se indicaba que a la fuerza motriz estacionaria disponible en el sistema de propulsión se le debe adicionar el efecto de la fuerza de atracción o fuerza normal que se genera en el MSLIP. A continuación se hace el mencionado estudio aplicado a los MSLIP-H de varios valores de entrehierro modelado con varios ángulos de inclinación en el apartado anterior.

Con el incremento del entrehierro disminuye la fuerza normal; sabiendo que ésta es de atracción, es posible hallar en primera aproximación el empuje nominal necesario en cada caso para que cada uno de los cuatro motores muevan un vehículo de 18.000/4 kg en terreno llano, según se estableció en el apartado 4.1.1 de esta tesis. Considerando un peso aproximado del deslizador de 100 kg [29], y teniendo en cuenta la fuerza normal obtenida en cada caso (**Tabla 5.3**), este empuje resulta ser, aplicando las ecuaciones (4.1) a (4.4) de:

$$\frac{(M)}{2 * t} * 13.88^2 + C_r * (M) * 9.81 + \left(\frac{1}{2} * 1.29 \frac{kg}{m^3} * 0.29 * 9.3726 m^2\right) * (13.88 m/s)^2 \quad (5.5)$$

Siendo  $C_r$  el coeficiente de rodadura, que se estima en 0.013 [5], y  $M$ :

$$M = \left( M_{bus} + 4 * M_{ML} + \frac{4 * F_n}{g} \right) \quad (5.6)$$

Siendo  $M_{bus}$  la masa del Autobús estimada en 18000 kg,  $M_{ML}$  es la masa de cada motor en kg y  $F_n$  la fuerza normal ejercida por cada uno de los motores de imanes permanentes (Ecuación 5.6).

De esta manera se tiene en cuenta el incremento de peso sobre el motor en carga que supone la existencia de la fuerza de atracción que experimenta el deslizador en cada caso. Los resultados en régimen permanente del empuje aportado por el motor en cada caso y del empuje necesario en régimen permanente (N) son los mostrados en la **Tabla 5.5**. En esta tabla se ha añadido una última columna que muestra el incremento en el empuje que ha de suministrar el motor en el caso de que el vehículo ruede sobre terreno con una pendiente del 3% de acuerdo a la ecuación (4.5).

Tabla 5.5: MSLIP-H modelado con varios ángulos de inclinación y entrehierro.

$\Delta D$	Entre-hierro (mm)	Fuerza de empuje (N)	Empuje necesario en régimen permanente (N) Sobre llano	Empuje necesario en régimen permanente (N) Pendiente 3%
0	5	10,57	4154,65	5850,94
	10	10,13	4078,49	5743,05
	15	8,94	4117,39	5798,15
	20	8,51	4156,64	5853,76
	30	6,21	4224,23	5949,52
112 $\tau s$	5	11,02	4223,36	5948,30
	10	9,82	3817,84	5373,77
	15	8,69	3878,59	5459,84
	20	8,29	3833,54	5396,01
	30	6,18	3970,23	5589,67
314 $\tau s$	5	10,71	3984,33	5609,64
	10	9,90	4044,83	5695,35
	15	8,74	3677,59	5175,07
	20	7,74	3750,62	5278,54
	30	6,04	3784,01	5325,84
$\tau s$	5	10,41	3821,19	5378,52
	10	9,50	3831,23	5392,74
	15	8,37	3852,94	5423,49
	20	7,51	3631,89	5110,32
	30	5,88	3706,42	5215,91
514 $\tau s$	5	10,77	3672,52	5167,89
	10	9,54	3701,42	5208,83
	15	8,49	3736,33	5258,29
	20	7,24	3765,79	5300,03
	30	5,70	3439,44	4837,66
312 $\tau s$	5	9,83	3492,78	4913,24
	10	8,78	3516,23	4946,46
	15	7,65	3539,82	4979,88
	20	6,95	3563,25	5013,07
	30	5,50	3584,86	5043,69

En todos los casos el motor alimentado a  $3 \text{ A/mm}^2$  tiene una fuerza de propulsión suficiente para mover la carga estimada: siempre existe un valor de inclinación de los imanes para cada entrehierro que hace que el empuje del motor supere el necesario. En todo caso, será el sistema de control que gestiona la alimentación del devanado

estatórico el encargado de inyectar el nivel de corriente preciso en cada caso, en el arranque y en régimen permanente. Puede que en aplicaciones sobre terrenos con mayor pendiente haya que aplicar una densidad de corriente superior a los  $3 \text{ A/mm}^2$  y evaluar las pérdidas del sistema con el fin de diseñar un sistema de refrigeración adecuado a cada aplicación.

Con este análisis se pudo determinar y seleccionar el mejor modelo y más adecuado para utilizarlo como posible motor para un sistema de transporte; se descartan por razones físicas los modelos con entrehierro menor a 15 mm debido a que un sistema de transporte necesita una distancia mínima entre el suelo y la cara inferior del deslizador o dispositivo móvil. Esta distancia mínima garantiza que el vehículo no este afectado por irregularidades del terreno, baches o elementos ajenos a la estructura. Las **Figura 5.25** hasta la **Figura 5.27** muestran los resultados de las fuerzas de empuje para cada modelo simulado variando el ángulo de inclinación y con un entrehierro de 15 mm, 20 mm y 30 mm respectivamente. Claramente se observa que cuanto mayor sea el entrehierro menor será la fuerza de propulsión del modelo; para mover la misma carga, será necesario ajustar el nivel de corriente aportado al estator.

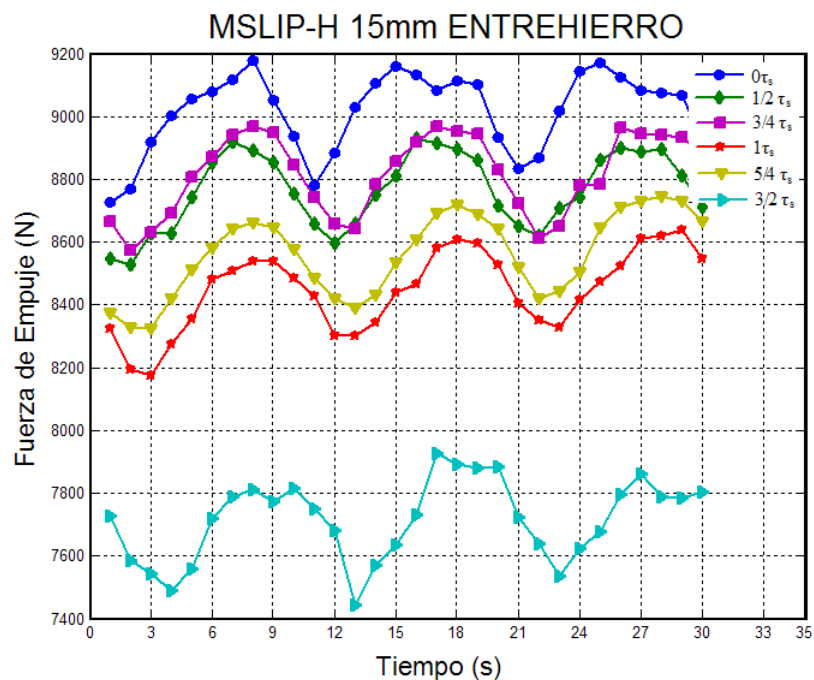


Figura 5.25. Fuerzas de Empuje del MSLIP-H con entrehierro de 15mm.

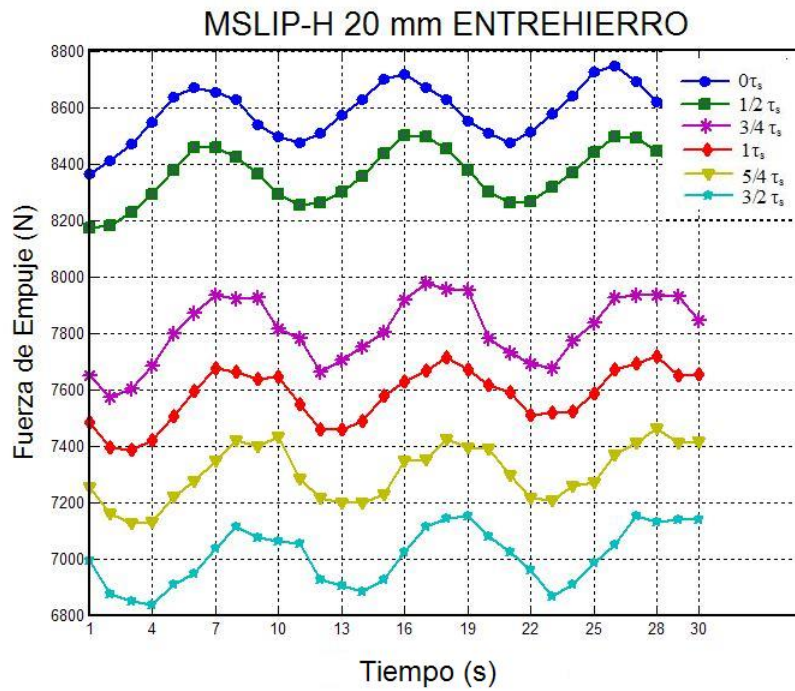


Figura 5.26. Fuerzas de Empuje del MSLIP-H con entrehierro de 20 mm.

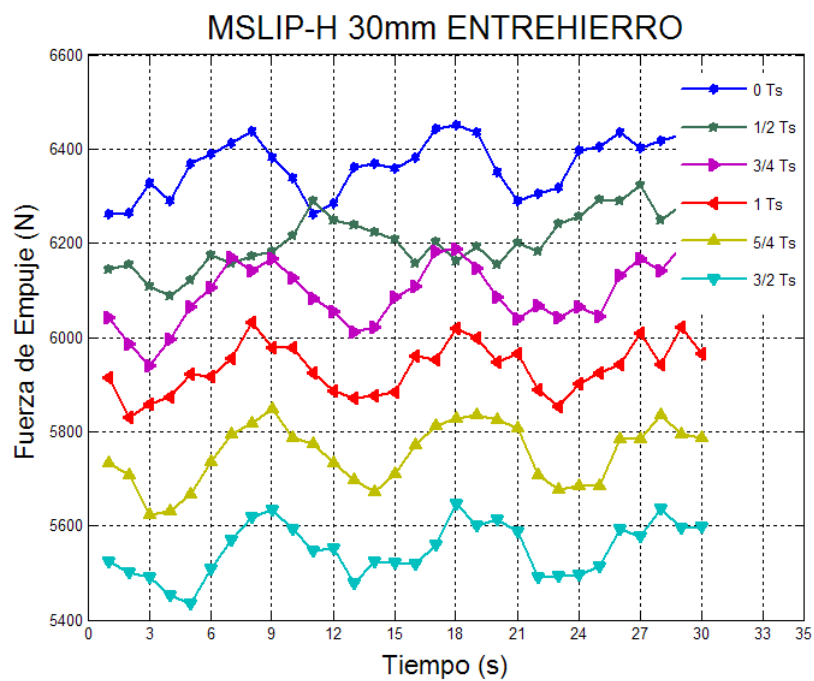
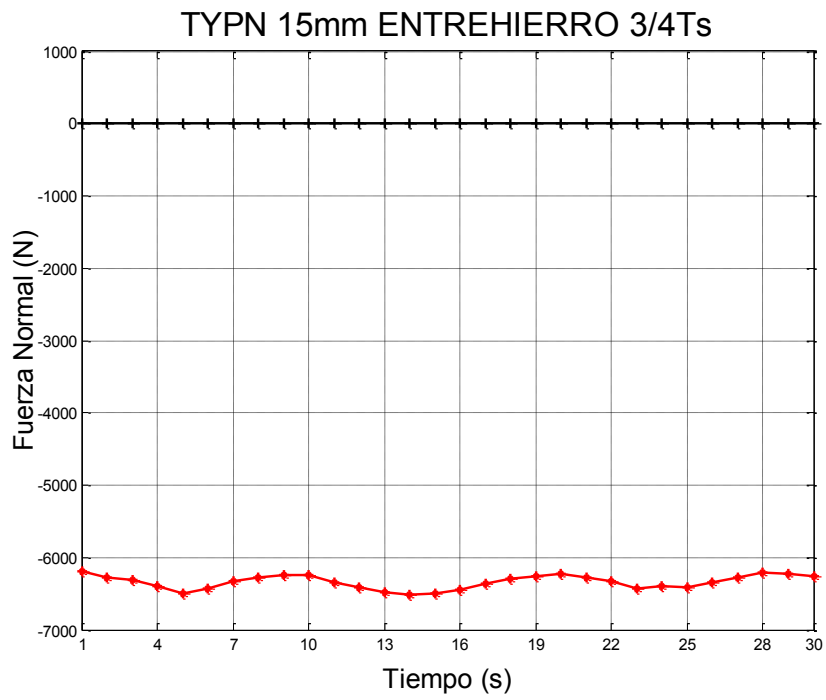
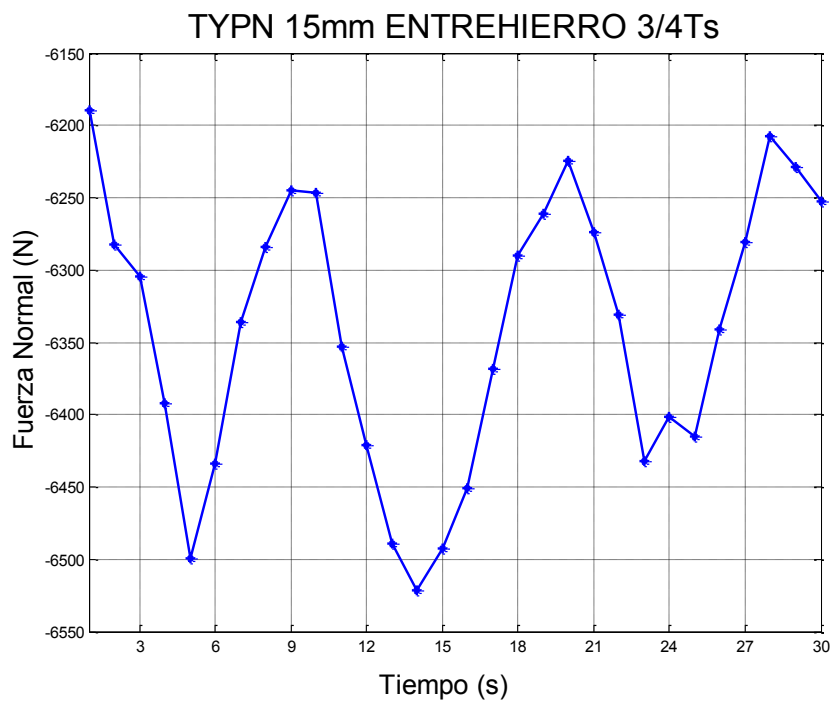


Figura 5.27. Fuerzas de Empuje del MSLIP-H con entrehierro de 30 mm.

Las **Figura 5.28**, **Figura 5.29** y **Figura 5.30** muestran el resultado de la fuerza Normal o de atracción que se forma en los prototipos TYPN a 15, 20 y 30 mm de entrehierro con mejores valores de acuerdo a la relación  $F_e/Rizado$ .

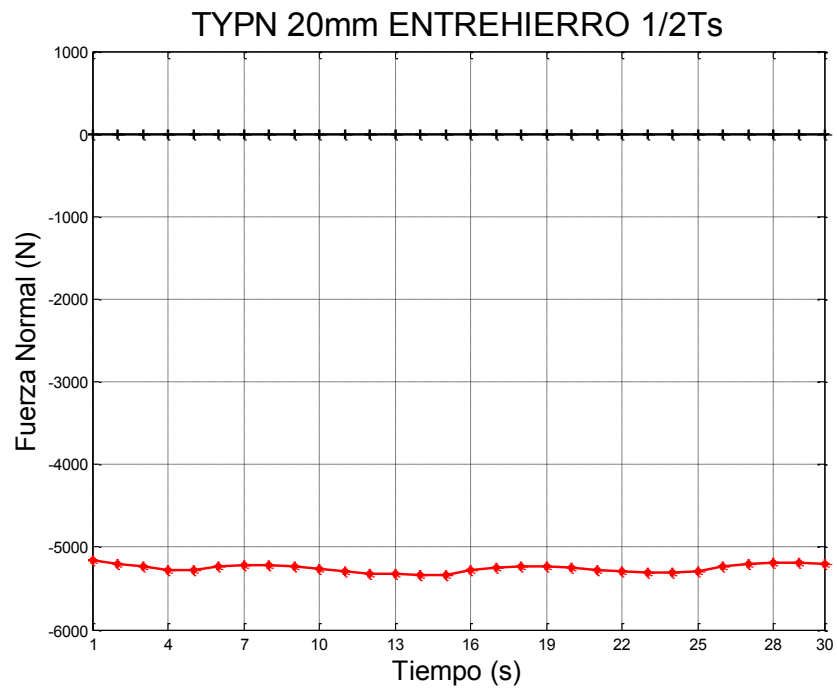


**A**

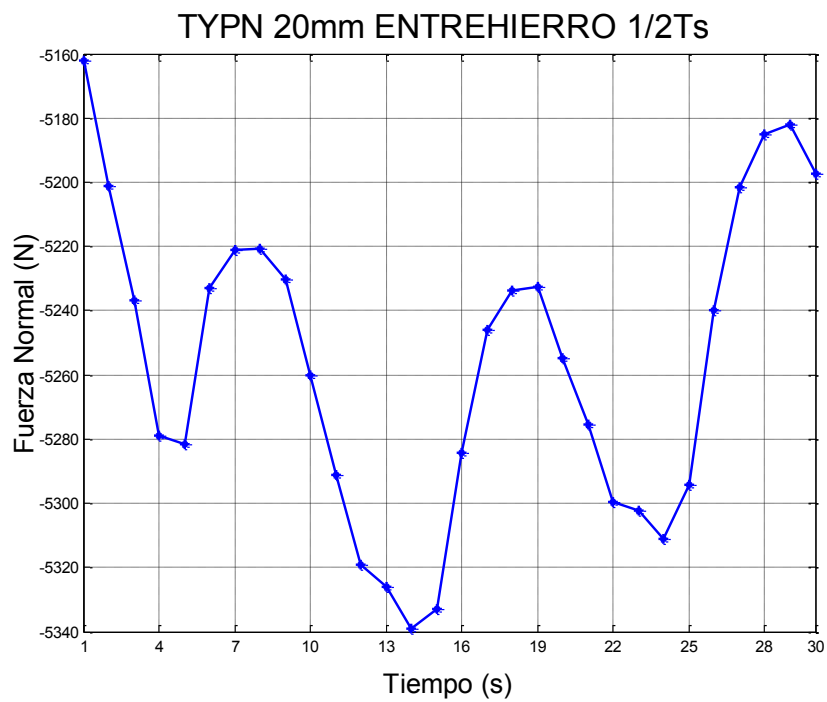


**B**

Figura 5.28: Fuerza Normal modelo TYPN con 15mm de Entrehierro y 3/4Ts. A) Fuerza normal con referencia al eje X. B) Fuerza Normal vista con sus límites máximos.



**A**



**B**

Figura 5.29: Fuerza Normal modelo TYPN con 20mm de Entrehierro y  $1/2T_s$ . A) Fuerza normal con referencia al eje X. B) Fuerza Normal vista con sus límites máximos.

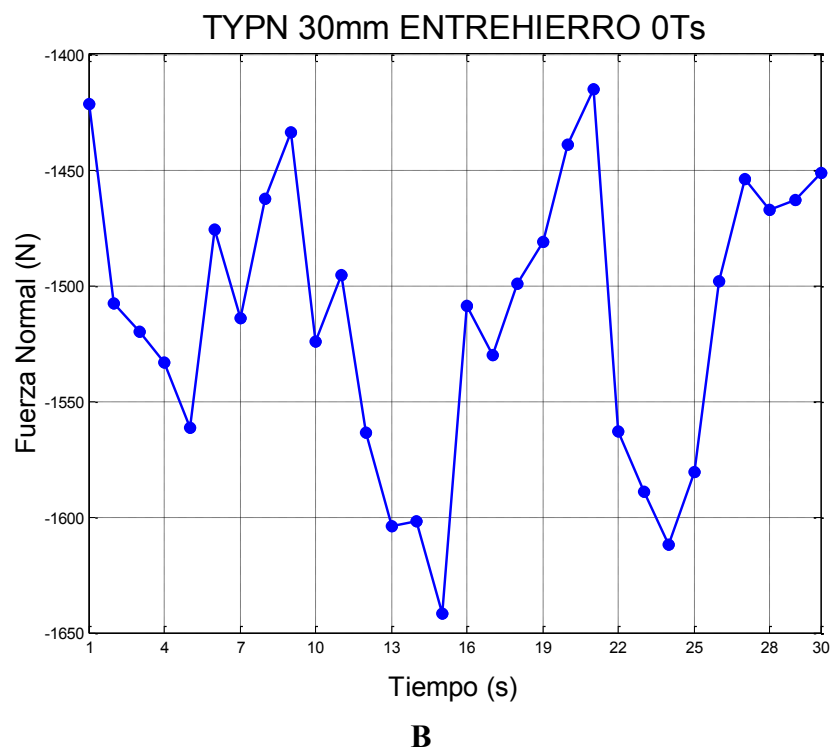
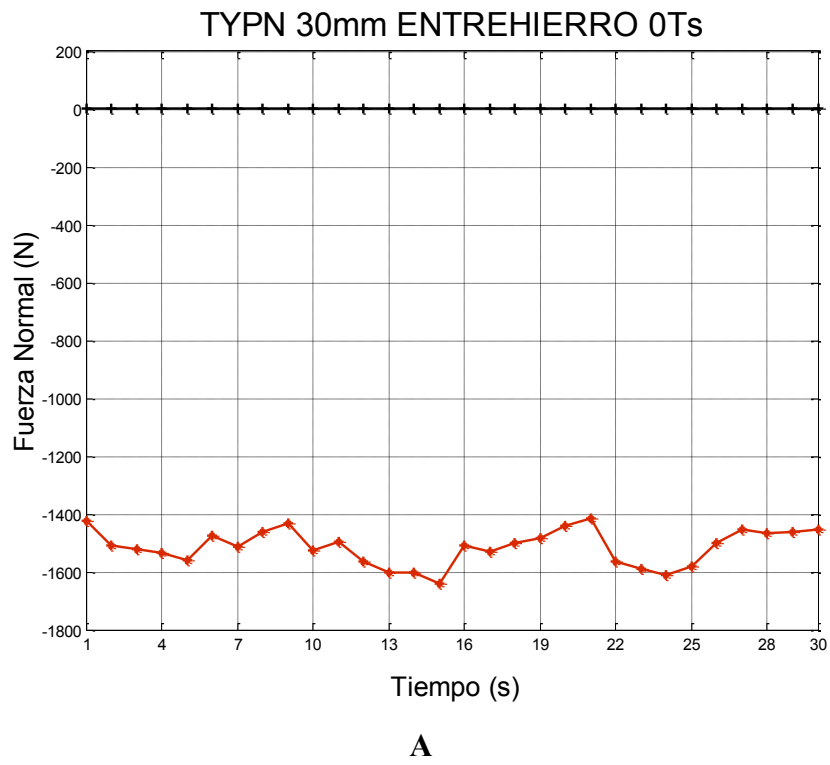


Figura 5.30: Fuerza Normal modelo TYPN con 30mm de Entrehierro y 0Ts. A) Fuerza normal con referencia al eje X. B) Fuerza Normal vista con sus límites máximos.



La **Figura 5.31** compara la fuerza Normal de los prototipos que presentan mejor relación de Fe/Rizado; se observa lógicamente que a mayor entrehierro menor es la fuerza normal.

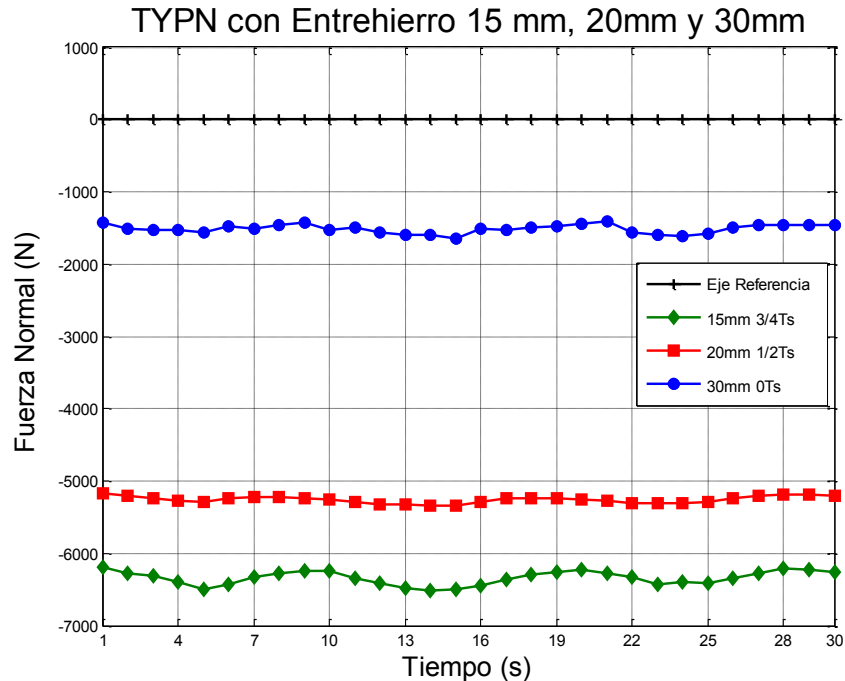


Figura 5.31: Fuerza Normal de los modelos que mejor resultado presentaron según el ratio Fe/Rizado.

### 5.3.2 Conclusiones.

Se han realizado 30 simulaciones en régimen dinámico del MSLIP-H propuesto y se han obtenido valores de la fuerza de empuje, rizado y de la fuerza normal. Se han simulado diversos espesores de entrehierro (5-30 mm) y distintos ángulos de inclinación de los imanes del deslizador (correspondientes a desplazamientos de entre 0 y 3/2 del paso de ranura). Cada prototipo está alimentando con la misma potencia de entrada y se simula a la misma velocidad lineal del deslizador.

- La fuerza de empuje que presenta el modelo a 5 mm de entrehierro es la mayor pero su rendimiento se ve afectado por el alto valor de rizado, rizado que produce mayor vibración, pérdidas y ruido en el motor.
- La inclinación de los imanes para el MSLIP-H no mejora la fuerza de empuje.

- Existe un valor de la inclinación que ofrece la mejor relación Empuje vs Rizado y que es diferente para cada entrehierro.
- Se obtiene que la fuerza de retención se reduce con la adecuada inclinación de los imanes en los MSLIP-H con estator ferromagnético y ranura semicerrada para espesores de entrehierro de hasta 30 mm.
- Se comprueba que con el incremento del espesor de entrehierro, la inclinación óptima de los imanes de los MSLIP-H decrece.
- En todos los casos el motor alimentado a 3 A/mm<sup>2</sup> tiene una fuerza de propulsión suficiente para mover la carga estimada. Para su cálculo se ha evaluado el incremento de peso sobre el del propio motor en carga que supone la existencia de la fuerza de atracción que experimenta el deslizador en cada caso.

## Referencias.

- [1] M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian and S. Underwood. Design considerations of sinusoidally excited permanent-magnet machines for low-torque-ripple applications. *Industry Applications, IEEE Transactions On* 41(4), pp. 955-962. 2005.
- [2] R. J. Cruise and C. F. Landy. Reduction of cogging forces in linear synchronous motors. Presented at Africon, 1999 IEEE. 1999.
- [3] K. Lim C., J. Woo K., G. Kang H., J. Hong P. and G. Kim T. Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motors. *Magnetics, IEEE Transactions On* 38(2), pp. 1157-1160. 2002.
- [4] W. Jie and W. Yan Y. A new technique for reducing cogging torque in EPS permanent magnet brushless DC motor. Presented at Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference On. 2007.
- [5] J. Lee, H. Lee, Y. Chun, M. Sunwoo and J. Hong. The performance prediction of controlled-PM LSM in various design schemes by FEM. *IEEE Trans. Magn.* 36(4), pp. 1902-1905. 2000.
- [6] Z. Q. Zhu and D. Howe. Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines. *Energy Conversion, IEEE Transactions On* 15(4), pp. 407-412. 2000.
- [7] P. J. Hor, Z. Q. Zhu, D. Howe and J. Rees-Jones. Minimization of cogging force in a linear permanent magnet motor. *Magnetics, IEEE Transactions On* 34(5), pp. 3544-3547. 1998.
- [8] G. González Palomino. Optimización del empuje y las fuerzas de diente en dos modelos de motores lineales síncronos de imanes permanentes. 2. Available: <http://hdl.handle.net/10016/15019>.
- [9] G. H. Jang, J. W. Yoon, K. C. Ro, N. Y. Park and S. M. Jang, "Performance of a brushless DC motor due to the axial geometry of the permanent magnet<br />," *IEEE Trans. Magn*, vol. 33, pp. 4101-4103, Sep 1997, 1997.
- [10] G. Xianguo, Y. Ming and X. Dianguo, "Research on thrust ripples elimination technique for double sided PM linear motor<br />," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference On*, 2008, pp. 3449-3452.
- [11] O. C. Zienkiewicz and Y. K. Cheung, *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics* MacGraw-Hill, 1967.
- [12] J. Zhao, X. Zhang and J. Zhang, "<br />Analysis and study thrust ripple of PMSLM," in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference On*, 2008, pp. 3439-3442.

- [13] M. Jafarboland and A. Nekoubin, "Design and Optimization of a Double-Sider Linear Induction Motor Based on Finite Element Method," *I. R. E. E.*, vol. 5.
- [14] C. F. Wang, J. X. Shen, L. L. Wang and K. Wang, "A novel permanent magnet flux-switching linear motor," in *Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference on*, 2008, pp. 116-119.
- [15] D. L. Trumper, K. Won-Jong and M. E. Williams, "Design and analysis framework for linear permanent-magnet machines," *Industry Applications, IEEE Transactions On*, vol. 32, pp. 371-379.
- [16] N. Bianchi, S. Bolognani and A. D. F. Cappello, "Reduction of cogging force in PM linear motors by pole-shifting," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 152, pp. 703-709.
- [17] W. Chu and Z. Zhu. Investigation of torque ripples in permanent magnet synchronous machines with skewing. 2013.
- [18] J. Gieras F. and Z. Piech J., *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems*. Electric Power Engineering Series, 2000.
- [19] G. González Palomino. Optimización del empuje y las fuerzas de diente en dos modelos de motores lineales síncronos de imanes permanentes. 2. Available: <http://hdl.handle.net/10016/15019>.
- [20] J. Boyes, "Reciprocating machinery analysis with FFT analyser," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 105, 1981.
- [21] S. Braun, D. Ewins and S. Rao S. Encyclopedia of vibration, volume 2, chapter computational methods: Object oriented programming in FE analysis by I. klapka, A. cardona and P. devloo. 2001.
- [22] I. S. Jung, J. Hur and D. S. Hyun, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters." *IEEE Trans. Magn*, vol. 37, pp. 3653-3657, Sep 2001, 2001.
- [23] M. Platen and G. Henneberger. Examination of leakage and end effects in a linear synchronous motor for vertical transportation by means of finite element computation. *Magnetics, IEEE Transactions On* 37(5), pp. 3640-3643. 2001.
- [24] C. Breton, J. Bartolome, J. Benito, G. Tassinario, I. Flotats, C. Lu and B. Chalmers. Influence of machine symmetry on reduction of cogging torque in permanent-magnet brushless motors. *Magnetics, IEEE Transactions On* 36(5), pp. 3819-3823. 2000.
- [25] R. J. Cruise and C. F. Landy. Reduction of cogging forces in linear synchronous motors. Presented at Africon, 1999 IEEE. 1999.
- [26] R. P. Deodhar, D. A. Staton and T. J. Miller. Modelling of skew using the flux-mmfm diagram. Presented at Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996., Proceedings of the 1996 International Conference On. 1996.

- [27] S. Jang M., S. Lee H. and I. Yoon K. Design criteria for detent force reduction of permanent-magnet linear synchronous motors with halbach array. *Seok M. Jang*. 38(5), pp. 3261-3263. 2002.
- [28] J. Gieras F., Z. Piech J. and B. Tomczuk Z. *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems* (Second Edition ed.) 2012 Vol 20.
- [29] Magnetic Materials Producers Association. *Standard Specifications for Permanent Magnet Materials* 1996.
- [30] In-Soung Jun, Jin Hur and Dong-Seok Hyun, "Performance Analysis of Skewed PM Linear Synchronous Motor According to Various Design Parameters", in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, issue 5, part 1, pp. 3653 – 3657, Sept. 2001.
- [31] E. Fujitu, S. Tahara and K. Ogawa, "Thrust of 2-pole PM linear synchronous motor with halbach array," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference On*, Tahara, S.; Ogawa, K., 2009, pp. 1-4.



# CAPITULO 6

## 6. PROPUESTA DE NUEVAS TOPOLOGÍAS DEL MSLIP-H.

Este capítulo propone el estudio de nuevas topologías de MSLIP-H para mejorar el diseño realizado de modo que éste genere la fuerza de empuje con un nivel bajo de vibración y se reduzca la fuerza normal. Sobre el motor propuesto se modifica la geometría de los imanes del deslizador, generando nuevas topologías de MSLIP-H (que hemos denominado *MSLIP-H TYP-C*, *TYP-7*, *TYP-L* y *TYP-Z*). Con ello se pretende reducir el “stress” de los propios imanes y concentrar la mayor parte de flujo magnético en el entrehierro produciendo una reducción del rizado de la fuerza de empuje. Las nuevas topologías propuestas, modifican la geometría de los imanes conservando el volumen final de los mismos. Se propone, a partir de las conclusiones obtenidas aplicando el método de imanes sesgados, emplear imanes con diferentes formas geométricas y mejorar los resultados obtenidos con imanes rectangulares. El valor de inclinación óptimo para las configuraciones Halbach será un parámetro a considerar en el diseño geométrico del deslizador, así como las orientaciones de los imanes que lo conforman. Las nuevas formas principalmente derivan del modelo óptimo inclinado descrito en el capítulo 5.

### 6.1. Nuevos diseños del deslizador de imanes permanentes.

En este apartado, se explicara los diferentes prototipos modelados buscando el diseño más adecuado, diseño que maximice el cociente fuerza de empuje/rizado.

Los imanes permanentes de tierras raras (normalmente de Nd-Fe-B) son muy adecuados para generar campos magnéticos gracias a su polarización espontánea, con ciclos de histéresis casi-cuadrados y grandes valores de campos coercitivos. Cuando la imanación se orienta preferentemente a lo largo de ciertos ejes cristalográficos llamados direcciones de fácil imanación, se simplifica enormemente el diseño del imán [1, 2].

Una relación de sus principales aplicaciones se describe en [3-6]. La forma de los imanes en el deslizador puede variar, así como también el sentido de su orientación magnética o polaridad, dependiendo del material y la forma de construcción. En [7-11] se exponen diferentes técnicas de fabricación de los imanes permanentes para diversas aplicaciones. Estos métodos de fabricación recurren habitualmente al sistema de construcción por sinterizado de los imanes de tierras raras. Este método consiste en que el polvo se moldea en una estructura compacta anisótropa mediante compactación y sinterizado en un campo orientador. Este proceso produce un imán en el que las fronteras de grano se componen de desviaciones ricas en Nd de la composición primaria  $Nd_2Fe_{14}B$ , proveyendo la fijación de las fronteras del dominio. Uno de los problemas de este método es que los granos de **Nd-Fe-B** son muy susceptibles de oxidarse en su superficie, lo que limita seriamente el tamaño de grano que puede obtenerse [12].

El primer modelo de deslizador de imanes desarrollado se denominó *TYP-C*; en la **Figura 6.1** se muestra la nueva disposición de los imanes en el deslizador. Se genera a partir de la agrupación de dos prototipos estudiados con imanes sesgados a un ángulo determinado (en las dos posiciones posibles, sesgado hacia adelante, y sesgado hacia atrás). Esta geometría no entrega resultados satisfactorios y se descarta del estudio; sin embargo se hace mención al diseño elaborado que en esta disposición los vértices que forman cada bloque de los imanes concentran una gran densidad de flujo magnético, produciendo muchas pérdidas y deficiencias en el motor.

La **Figura 6.1A** (Modelo 3D) y **Figura 6.1B**. (Vista plano *YZ*) muestran la disposición de los imanes del diseño estudiado.



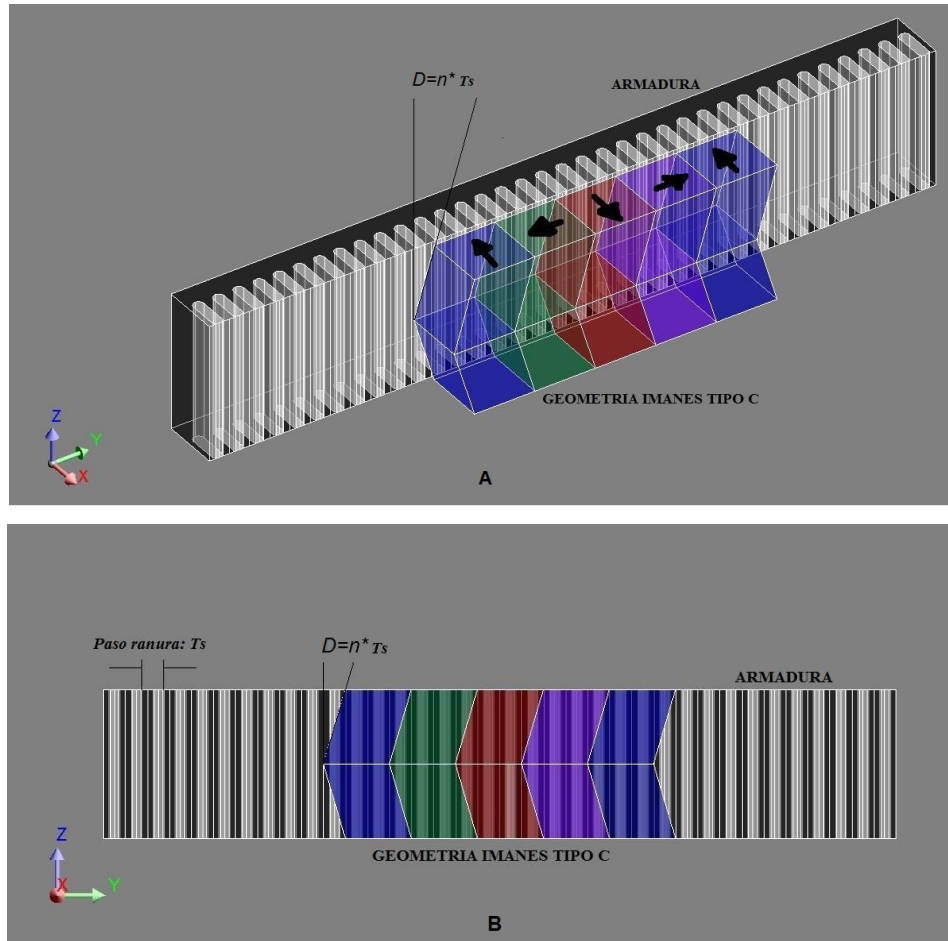


Figura 6.1: Geometría Imanes TYP-C, (A) Modelo 3D. (B) Vista sobre plano YZ.

Este diseño presenta bajos rendimientos y un aumento en las pérdidas y flujos de dispersión, la fuerza de empuje disminuye y el rizado aumenta; este diseño resulta poco atractivo a cumplir los objetivos principales de esta tesis, se descarta para posibles mejoras o diseños futuros.

### 6.1.1. Diseño geométrico TYP-7.

Esta geometría tiene la particularidad de que combina la geometría convencional del deslizador con la geometría de los imanes inclinados. La **Figura 6.2** muestra el modelo del deslizador denominado TYP-7 y es la primera alternativa real al MSLIP-H optimizado; consiste en fraccionar cada imán por el plano medio  $XY$ , manteniendo la parte superior sin variar e inclinando la mitad inferior el valor correspondiente al ángulo óptimo (ecuación 5.4) estudiado en el capítulo 5, y revisado para la nueva geometría.

La propuesta se analiza mediante cálculo numérico; los resultados de la simulación se han comparado y contrastado con los resultados encontrados en los anteriores prototipos modelados. La **Figura 6.2(B)** muestra la sección longitudinal del diseño según el plano  $YZ$ ;

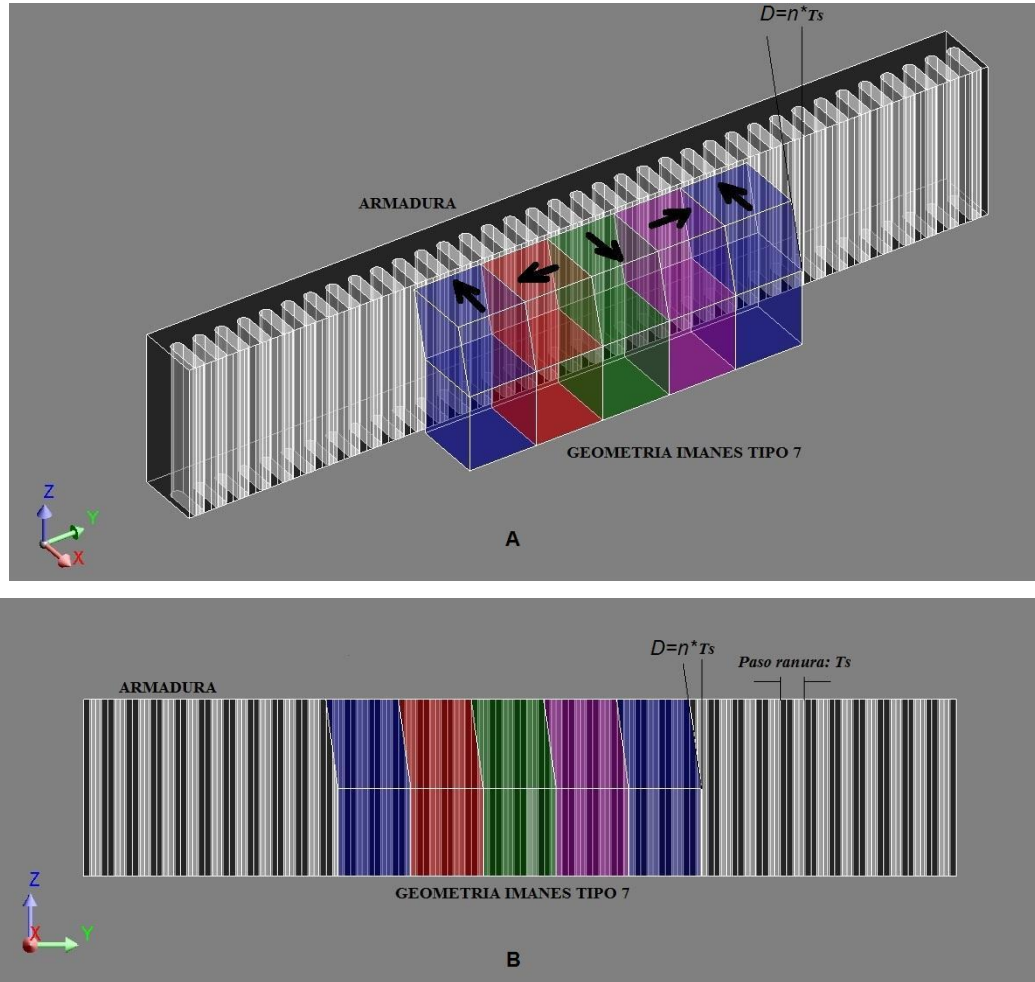


Figura 6.2. Topología del MSLIP-H TYP-7. (A) Prototipo TYP-7 en 3D, (B) Geometría de deslizador vista sobre el plano  $YZ$ .

Se analiza el modelo TYP-7 aplicando una corriente de densidad  $3 \text{ A/mm}^2$ , para los espesores de entrehierro de 5mm, 10mm y 15mm y para distintas inclinaciones; en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para la inclinación que resulta ser la óptima de  $\tau_s/2$ . Se muestran además los resultados obtenidos en los prototipos descritos en el capítulo 5 (tabla 5.4) para que resulte fácil compararlos.

Tabla 6.1: Fuerzas comparadas del prototipo inicial y el TYP-7 inclinado  $1/2 \tau_s$ .

Entrehierro (mm)	Ángulo de inclinación respecto a $\tau_s$	Componente "x" de Fza. Normal (kN)	Componente "y" de Fza. de Empuje (kN)	Rizado de la Fza. Empuje (kN)	Fe/ Rizado
5	"0"	11,44	10,57	0,75	14,14
	"1/2"	10,38	11,02	0,79	13,86
	"3/4"	10,92	10,71	0,90	11,89
	"1"	11,47	10,41	0,78	13,38
	<b>"5/4"</b>	12,41	10,77	0,65	<b>16,61</b>
	"3/2"	12,40	9,83	0,66	14,92
10	"0"	6,76	10,13	0,61	16,49
	"1/2"	7,61	9,82	0,55	17,77
	"3/4"	6,98	9,90	0,61	16,12
	<b>"1"</b>	8,88	9,50	0,48	<b>19,71</b>
	"5/4"	9,07	9,54	0,57	16,69
	"3/2"	9,91	8,78	0,46	19,17
15	"0"	4,81	8,94	0,45	19,80
	"1/2"	5,83	8,69	0,40	21,54
	<b>"3/4"</b>	6,29	8,74	0,40	<b>22,02</b>
	"1"	6,81	8,37	0,46	18,12
	"5/4"	6,95	8,49	0,42	20,03
	"3/2"	7,25	7,65	0,48	15,86

MSLIP-H NUEVAS TOPOLOGÍAS MODELO TYP-7					
Entrehierro (mm)	Ángulo de inclinación respecto a $\tau_s$	Componente "x" de Fza. Normal (kN)	Componente "y" de Fza. de Empuje (kN)	Rizado de la Fza. Empuje (kN)	Fe/ Rizado
5	"1/2"	6,96	12,29	0,80	15,36
10	"1/2"	4,72	10,67	0,66	16,18
15	"1/2"	1,98	9,47	0,41	22,90

El modelo TYP-7 con entrehierro de 5 mm aporta un empuje mayor que el de los anteriores modelos; el incremento es del 9.8% respecto al modelo sin inclinación y de un 14% respecto al mejor de los modelos previos; sin embargo presenta un rizado alto. Los resultados muestran que del ratio *Fempuje/Rizado* aumenta para el entrehierro de 15mm comparándolo con los resultados previos y con el mismo ángulo de inclinación. La fuerza normal se reduce respecto a la estudiada en prototipos anteriores.

La **Figura 6.3** muestra en formato sombra la densidad de flujo que se forma en el estator y el deslizador del prototipo TYP-7; se aprecia que el material ferromagnético

del estator se torna con valores estables entre 1,8 y 2 T quedando al límite del parámetro establecido en 1,9 T para el hierro. Aparecen algunos puntos con saturación mayor a 1,9T que posiblemente resulta de algún campo remanente formado al paso del deslizador.

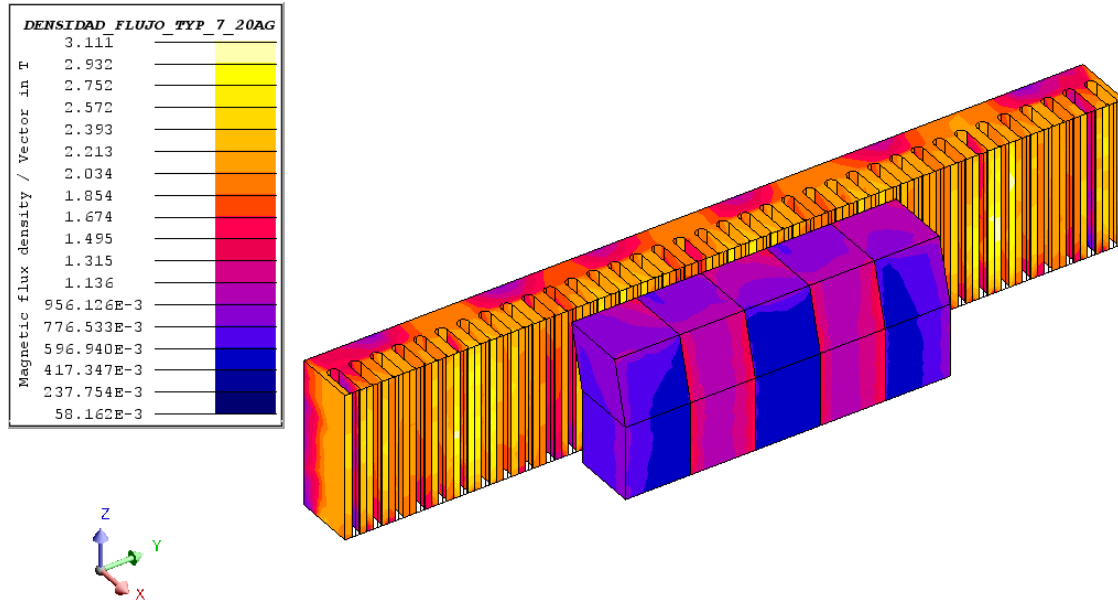


Figura 6.3: Densidad de Flujo del Prototipo MSLIP-H TYP-7.

La **Figura 6.4** muestra la distribución de la densidad de flujo en el entrehierro del nuevo prototipo TYP-7 con la geometría de los imanes inclinados a un ángulo equivalente a  $\Delta D = \tau_s/2$ ; se muestran las tres componentes de la densidad de flujo y se observa que el efecto del flujo magnético se torna con una densidad de flujo estable y dentro de parámetros; sus valores máximos y mínimos oscilan entre -0.983T y 1.005T.

La componente en  $Z$  no tiene mucha implicación en la distorsión del flujo ni afecta en mayor proporción el comportamiento del flujo magnético en el entrehierro para este modelo.

Las figuras **Figura 6.5** y **Figura 6.6** muestran las *componentes*  $X$  e  $Y$  de la densidad de flujo magnético en el entrehierro del modelo TYP-7; en estas graficas se observa que el modelo no pasa los límites de saturación de 1,9T.

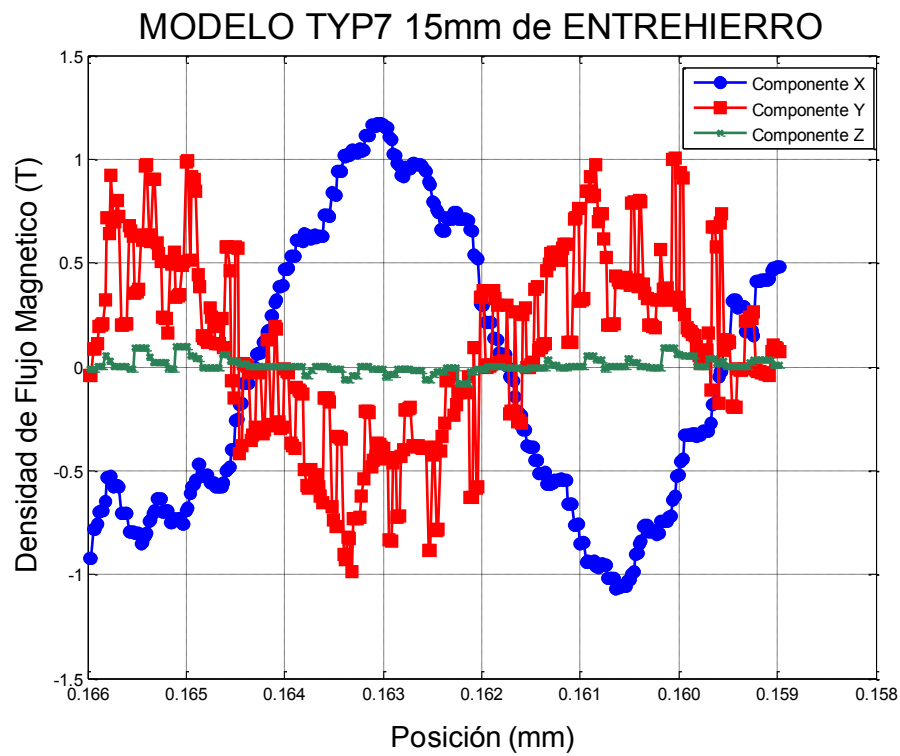


Figura 6.4: Densidad de Flujo Magnético Componentes  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  del modelo TYP-7 a 15mm de entrehierro.

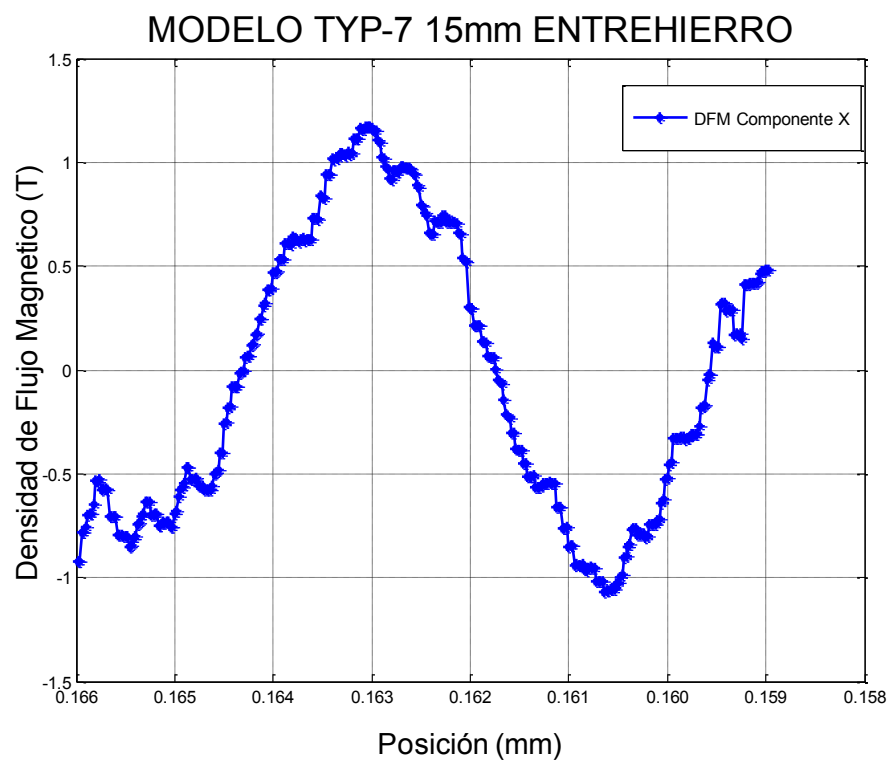


Figura 6.5: Componente  $X$  de la Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro de 15mm modelo TYP-7.

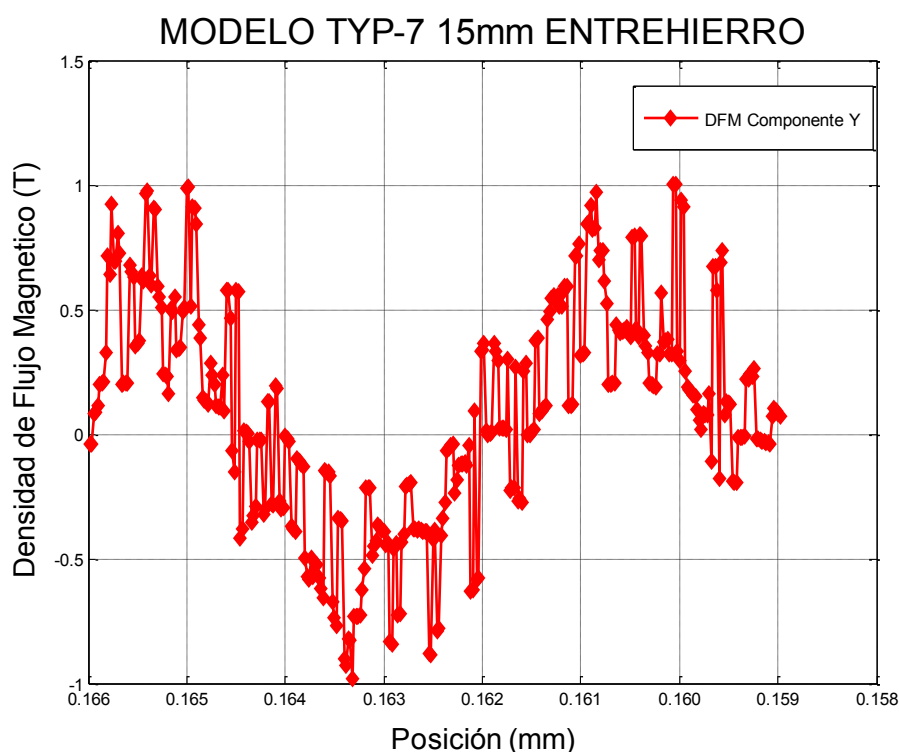


Figura 6.6: Componente Y de la Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro de 15mm modelo TYP-7.

Este estudio dio paso a probar con otras geometrías de imanes, que conseguirán mejorar los resultados en la reducción del rizado respecto a la fuerza de propulsión del MSLIP-H.

### 6.1.2. Diseño geométrico TYP-L.

Este modelo se deriva directamente del anterior, siendo en cierto sentido simétrico al modelo TYP-7; la inclinación de los imanes se efectúa en el extremo contrario al que se tomó para el prototipo TYP-7. Si tomamos como referencia el desplazamiento del deslizador en sentido negativo sobre el eje  $Y$ , el tramo inclinado de los imanes del deslizador apuntarán en dirección positiva sobre el eje  $Y$ , buscando una aproximación a la forma geométrica de una letra “L”.

La **Figura 6.7** muestra la geometría 3D de los imanes denominada TYP-L.

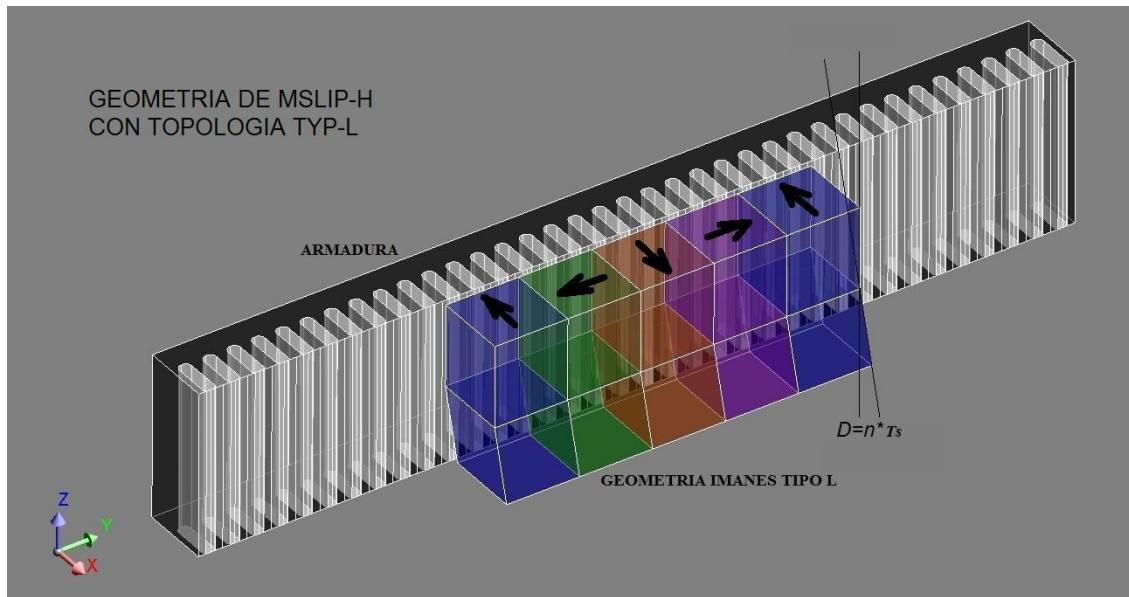


Figura 6.7: Topología del MSLIP-H TYP-L. Prototipo de topología L en 3D.

La **Figura 6.8** muestra el diseño en la sección longitudinal sobre el plano  $YZ$ ; esta geometría tiene la particularidad que combina la geometría convencional del deslizador con la geometría de los imanes inclinados a un ángulo equivalente a  $\Delta D = \tau_s/2$ , que resultó ser el mejor para esta nueva topología.

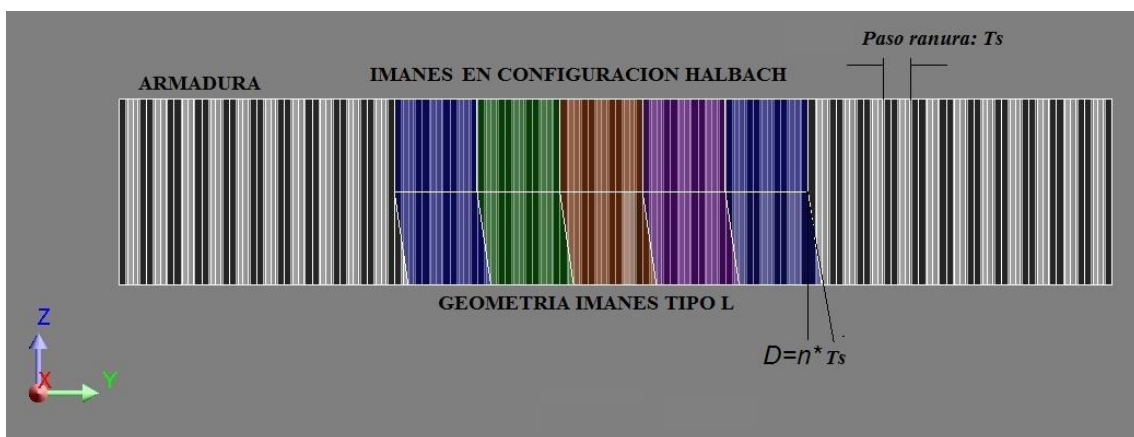


Figura 6.8: Topología del MSLIP-H TYP-L. (B) Geometría de deslizador vista sobre el plano  $YZ$ .

Con este segundo modelo se obtiene una leve mejora de respuesta en la fuerza de propulsión y una notable reducción de la fuerza normal o de atracción; el comportamiento de este modelo es levemente superior al tipo anterior, sobre todo con la orientación del primer diseño; sin embargo el rizado se mantiene prácticamente igual al conseguido con el modelo TYP-7. Se puede argumentar que este modelo mejora un poco las características del mejor de los motores diseñados en la tesis hasta ahora. La

siguiente tabla muestra los valores de fuerzas y rizado obtenidos en los prototipos TYP-7 y TYP-L.

Tabla 6.2: Fuerzas de Empuje y Normal en TYP-7 y TYP-L a 3 A/mm<sup>2</sup>.

MSLIP-H NUEVAS TOPOLOGÍAS MODELO TYP-7					
Entrehierro (mm)	Ángulo de inclinación respecto a $\tau_s$	Componente “x” de Fza. Normal (kN)	Componente “y” de Fza. de Empuje (kN)	Rizado de la Fza. Empuje (kN)	Fe/ Rizado
5	"1/2"	6,96	12,29	0,80	15,36
10	"1/2"	4,72	10,67	0,66	16,18
15	"1/2"	1,98	9,47	0,41	22,90

MSLIP-H NUEVAS TOPOLOGÍAS MODELO TYP-L					
Entrehierro (mm)	Ángulo de inclinación respecto a $\tau_s$	Componente “x” de Fza. Normal (kN)	Componente “y” de Fza. de Empuje (kN)	Rizado de la Fza. Empuje (kN)	Fe/ Rizado
5	"1/2"	6,75	12,09	0,71	16,97
10	"1/2"	3,54	10,54	0,55	19,25
15	"1/2"	0,86	9,49	0,41	23,19

En la última columna de la **Tabla 6.2** se presenta la relación de *Fe/Rizado*; ésta es mayor en el modelo TYP-L que en el TYP-7, luego las vibraciones del modelo TYP-L se reducen debido a reducción que experimenta el rizado. En la **Figura 6.9** se observa la fuerza de empuje para ambos modelos a 15mm de entrehierro con la geometría de los imanes inclinados a un ángulo equivalente a  $\Delta D = \tau_s/2$ .



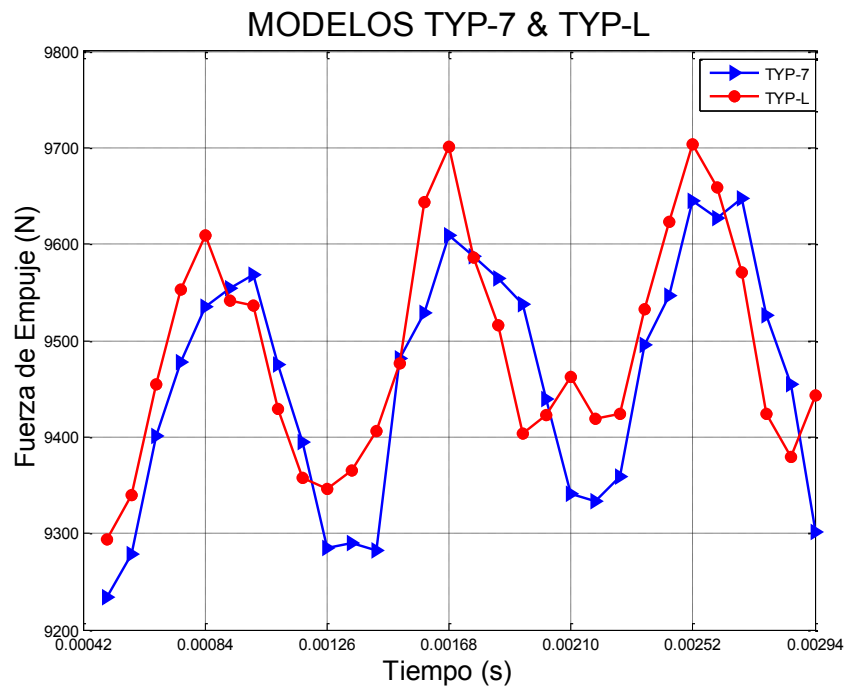


Figura 6.9: Fuerzas de Empuje de los prototipos TYP-7 y TYP-L a 15mm de entrehierro.

Las fuerzas normales o de atracción de los modelos se muestran en la **Figura 6.10** para un entrehierro de 15mm y con densidad de corriente  $3 \text{ A/mm}^2$ . Se observa que el valor de la fuerza de atracción es mucho menor en el modelo TYP-L; su Fuerza normal alcanza un valor de 1.98 kN frente a 0.86kN del TYP-L: se reduce en 56.54% aproximadamente.

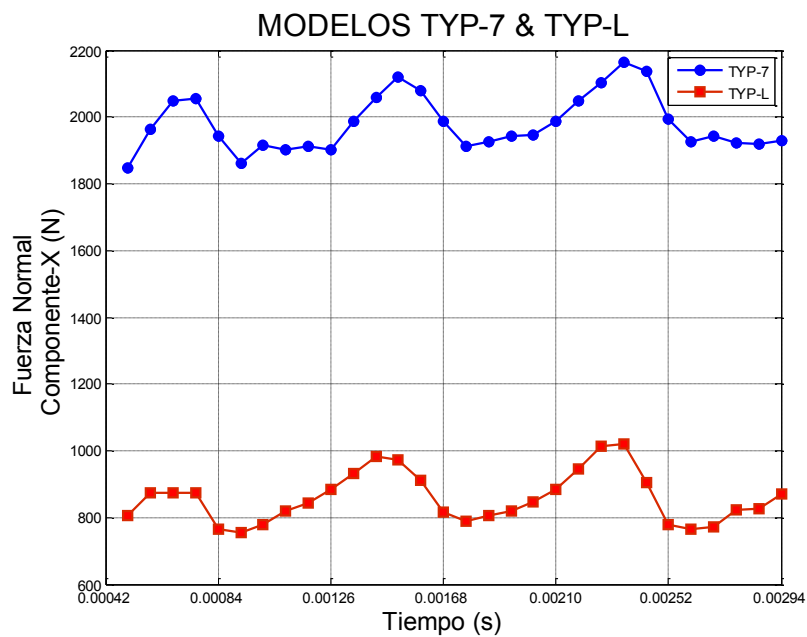


Figura 6.10: Fuerzas Normales de los modelos TYP-7 & TYP-L a 15mm de entrehierro.

La **Figura 6.11** muestra en formato sombra la densidad de flujo que se forma en el estator y el deslizador del prototipo TYP-L.

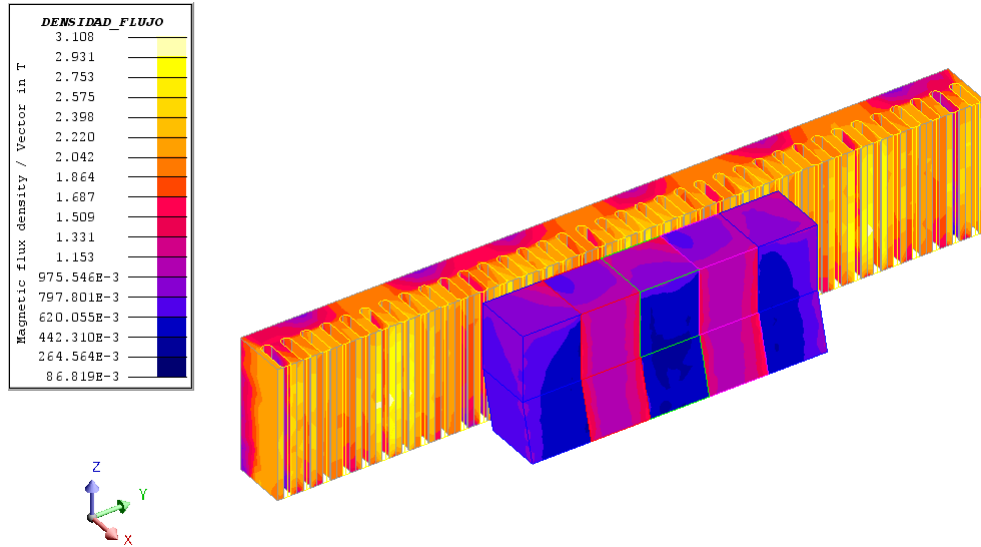


Figura 6.11: Densidad de Flujo del Prototipo MSLIP-H TYP-L.

La **Figura 6.12** muestra la distribución de la densidad de flujo en el entrehierro del nuevo prototipo TYP-L con la geometría de los imanes inclinados a un ángulo equivalente a  $\Delta D = \tau_s/2$ ; al igual que la **Figura 6.4**, se muestran las tres componentes de la densidad de flujo y se observa que el efecto del flujo magnético también se torna con una densidad de flujo estable y dentro de parámetros, con valores que alcanza los máximos y mínimos entre -1.05T y 1.15T. La componente en Z al igual que en el modelo previo, no tiene mucha implicación en la distorsión del flujo ni afecta en mayor proporción el comportamiento del flujo magnético en el entrehierro para este modelo.

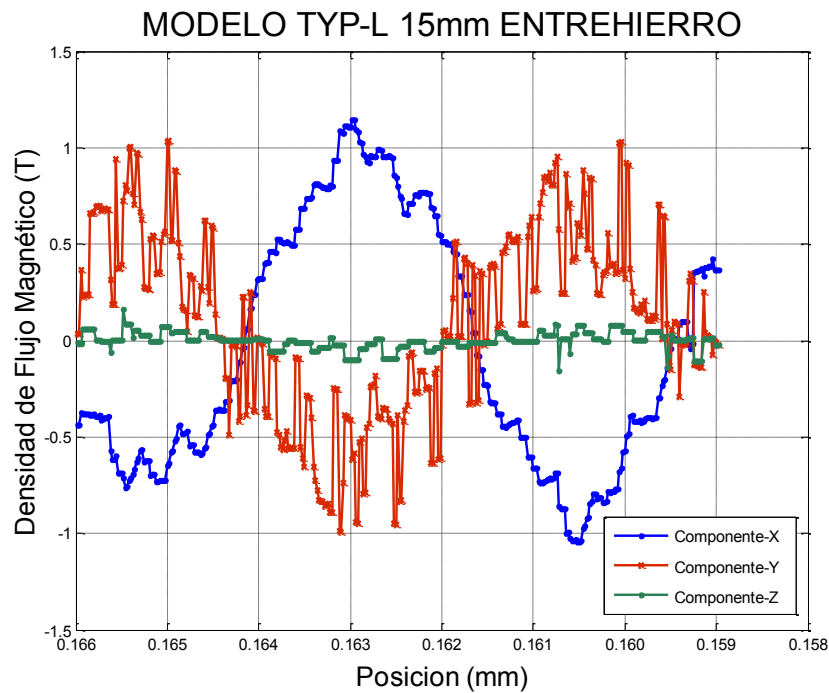


Figura 6.12: Densidad de Flujo Magnético Componentes  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  del modelo TYP-L a 15mm de entrehierro y  $\tau_s/2$ .

Las **Figura 6.13** y **Figura 6.14** muestran las *Componentes  $X$*  y *Componente  $Y$*  de la Densidad de Flujo Magnético en el entrehierro del modelo TYP-L. Al igual que en el modelo TYP-7, en estas gráficas se observa que este modelo TYP-L no sobrepasa los límites de saturación de 1,9T.

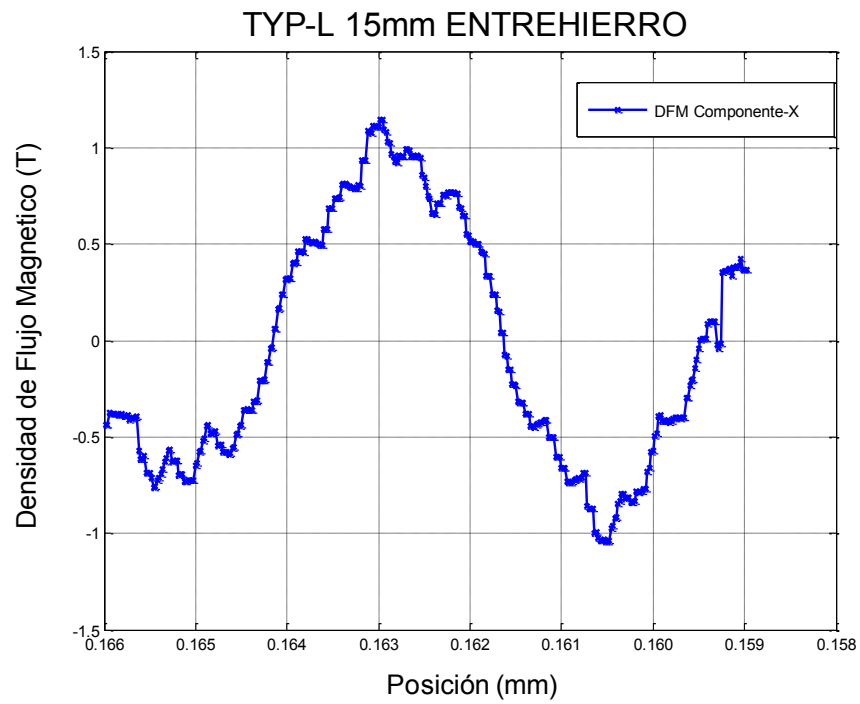


Figura 6.13: Componente X de Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro 15mm modelo TYP-L.

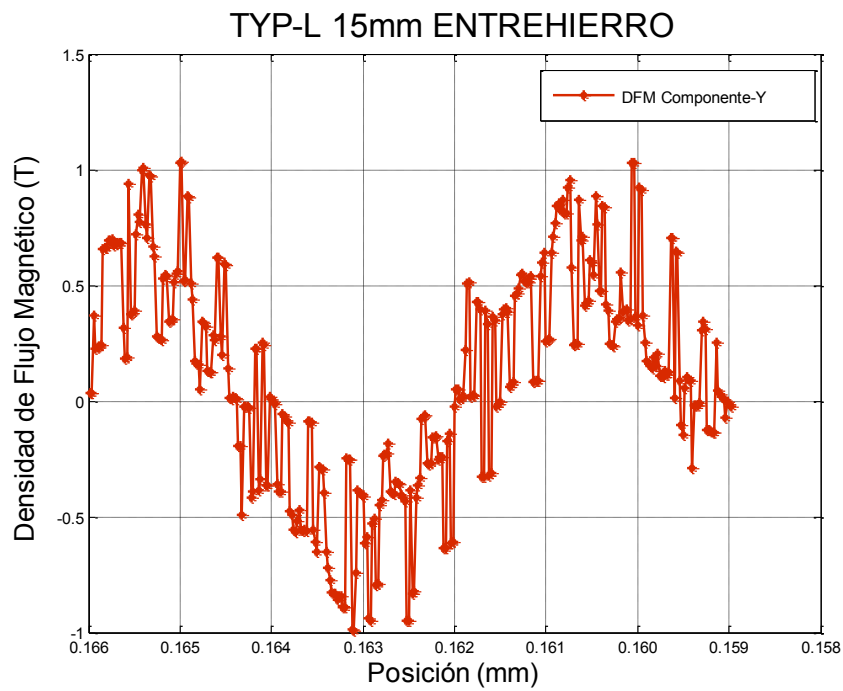


Figura 6.14: Componente Y de Densidad de Flujo Magnético en Entrehierro de 15mm modelo TYP-L.

### 6.1.3. Diseño geométrico TYP-Z.

El objetivo de esta geometría es mejorar el comportamiento del motor, utilizando una estructura que combina los modelos TYP-7 y TYP-L. La **Figura 6.15** muestra el tercer diseño propuesto; el aporte principal de esta tesis. El motor MSLIP-H TYP-Z propuesto se ha diseñado para propulsar un vehículo rodado mediante un deslizador de imanes en disposición Halbach con estator largo de material ferromagnético. La fuerza normal es de atracción. Por lo tanto en el diseño del motor ha de minimizar la fuerza de atracción y maximizar la de empuje, manteniendo un rizado mínimo del mismo. Con la estructura del modelo TYP-Z, se obtienen elevados valores de empuje con rizado óptimo.

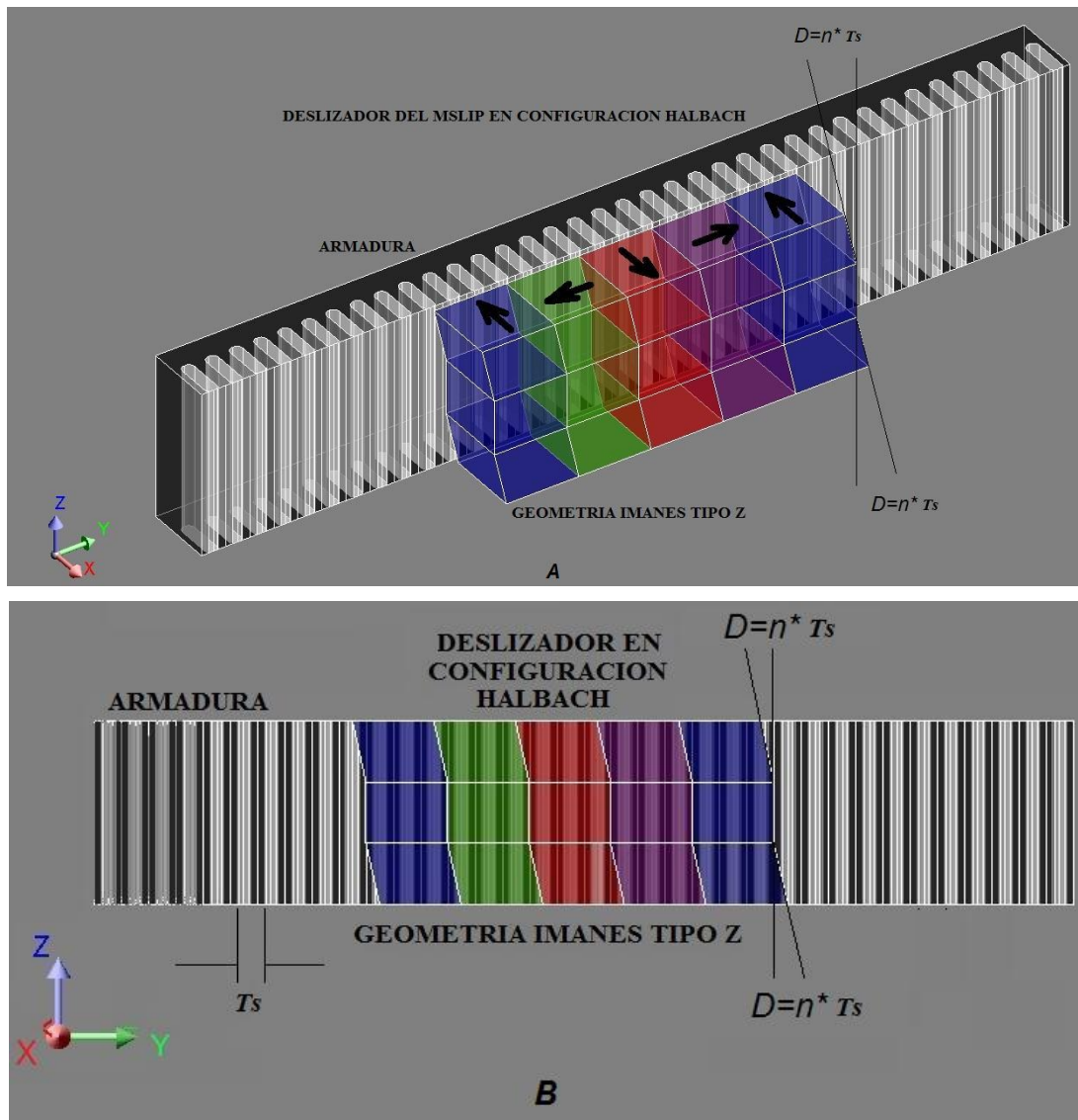


Figura 6.15. Topología MSLIP-H TYP-Z. (A) Prototipo TYP-Z en 3D, (B) Geometría en plano YZ.

Se realiza el estudio del prototipo para diversos ángulos de inclinación de los imanes del deslizador equivalente a  $\Delta D = 1/2, 3/4, 1, 5/4$  y  $3/2$  veces  $\tau_s$ , para diversos espesores de entrehierro (5 – 30 mm). La **Tabla 6.3** muestra el resultado de la fuerza de empuje y rizado de la misma, así como la fuerza de atracción. Este prototipo también se simula con una densidad de corriente de 3 A/mm<sup>2</sup>.

También ha de destacarse que cada una de las 25 simulaciones realizadas lleva un tiempo de procesamiento de aproximadamente 30 horas.

Tabla 6.3: Modelo TYP-Z con variación de ángulo de inclinación para distintos entrehierros.

PROTOTIPO TYP-Z MSLIP 3A/mm2 CON VARIACIÓN DE ÁNGULO DE INCLINACIÓN EN IMANES						
Entre-hierro	Ángulo de inclinación respecto a $\tau_s$	Componente X - Fn Deslizador (kN)	Componente Y - Fe Deslizador (kN)	Rizado de Fe (kN)	Rizado (%)	Fe/Rizado
5	"1/2"	7,60	12,17	0,86	7,04	14,21
	"3/4"	5,46	9,52	0,39	4,13	24,23
	"1"	4,76	9,43	0,34	3,61	27,67
	"5/4"	<b>4,21</b>	<b>9,32</b>	<b>0,31</b>	<b>3,34</b>	<b>29,95</b>
	"3/2"	4,84	11,64	0,53	4,53	22,07
10	"1/2"	4,76	10,73	0,55	5,12	19,52
	"3/4"	2,95	8,17	0,29	3,55	28,21
	"1"	2,41	8,04	0,29	3,59	27,85
	"5/4"	<b>1,93</b>	<b>7,96</b>	<b>0,24</b>	<b>3,04</b>	<b>32,84</b>
	"3/2"	2,30	10,22	0,33	3,23	30,93
15	"1/2"	3,18	9,53	0,38	3,94	25,41
	"3/4"	1,75	7,05	0,22	3,16	31,65
	"1"	1,26	6,95	0,21	3,07	32,56
	"5/4"	<b>0,79</b>	<b>6,83</b>	<b>0,20</b>	<b>2,88</b>	<b>34,76</b>
	"3/2"	0,93	9,06	0,26	2,89	34,61
20	"1/2"	2,00	8,43	0,31	3,70	27,00
	"3/4"	0,90	6,12	0,17	2,83	35,37
	"1"	<b>0,48</b>	<b>6,03</b>	<b>0,17</b>	<b>2,76</b>	<b>36,18</b>
	"5/4"	0,10	5,92	0,19	3,20	31,25
	"3/2"	0,04	8,01	0,24	2,98	33,60
30	"1/2"	1,17	6,58	0,22	3,27	30,56
	"3/4"	0,13	4,66	0,15	3,14	31,89
	"1"	<b>0,18</b>	<b>4,59</b>	<b>0,14</b>	<b>2,95</b>	<b>33,90</b>
	"5/4"	0,47	4,48	0,17	3,73	26,82
	"3/2"	0,37	6,28	0,23	3,69	27,11

Al igual que se hizo en el capítulo 5, en la **Tabla 6.4** se muestran las posibles combinaciones realizadas donde se ha marcado el ángulo de inclinación que para cada entrehierro cumple con la condición deseada de tener mayor fuerza de propulsión a menor nivel de vibración o rizado. También en la **Figura 6.16** se muestra la reducción de la fuerza de detención del primer modelo simulado TYP-Z de 5mm de entrehierro en comparación con el modelo inicial TYPN5AG.

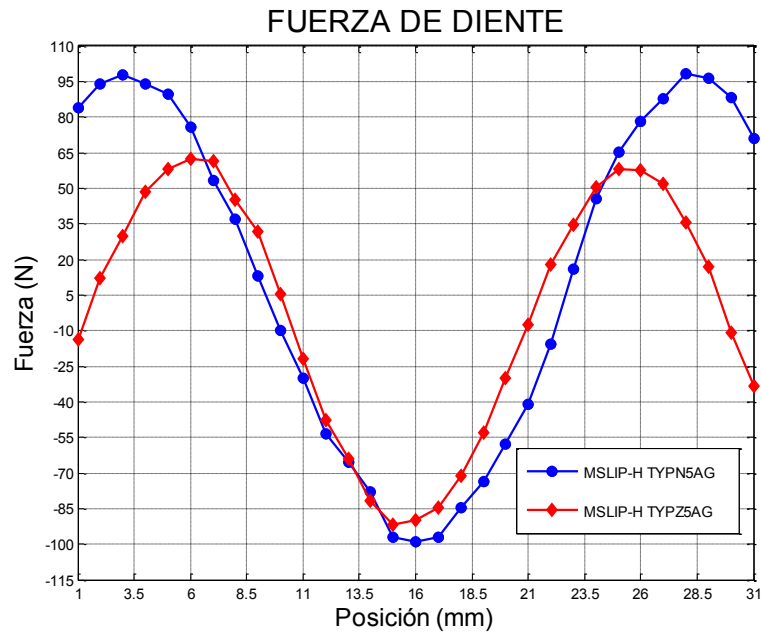


Figura 6.16: Fuerza de diente modelos TYPN5AG y TYP-Z5AG

La **Figura 6.16** muestra el resultado de la fuerza de detención de los dos modelos, TYPN5AG y TYPZ5AG. Al igual que los resultados obtenidos en la Figura 5.12, la fuerza de diente se comporta como una onda sinusoidal tomada en estado estático, representándose durante la simulación un ciclo completo de la misma; los resultados resultan cíclicos con cada paso de ranura. Se aprecia una mayor disminución de la fuerza de diente respecto al diseño de relación mejorada (TYPN5AG), cuyos máximo y mínimo se encuentran en 105N y -100N para el modelo TYPN5AG y 65N y -90N para el TYP-Z5AG; se comprueba que en el nuevo modelo la ondulación de la fuerza de diente se reduce en un 36.31% respecto a la que presenta el motor TYPN5AG.

Tabla 6.4: Simulaciones realizadas del MSLIP-H a estudiar y mejor modelo de acuerdo al ratio Fe/Rizado.

	INCLINACIÓN DE IMANES CON RESPECTO A PASO DE RANURA					
LONGITUD DEL ENTREHIERRO (mm)	$0\tau_s$	$\tau_s/2$	$3\tau_s/4$	$\tau_s$	$5\tau_s/4$	$3\tau_s/2$
5	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓
10	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓✓	✓
20	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓
30	✓	✓	✓	✓✓	✓	✓

Se observa también que para cada espesor de entrehierro, la inclinación tiende a reducir el valor de la fuerza de empuje. Sin embargo, analizando los valores de la **Tabla 6.3**, para cada valor de entrehierro, existe una inclinación que mejora el ratio fuerza de propulsión frente al rizado. Se determina que los mejores resultados obtenidos en el modelo TYP-Z varían en función del espesor de entrehierro:  $\Delta D = 5/4 \tau_s$  para los entrehierros 5mm, 10mm y 15mm, y  $\Delta D = 1 \tau_s$  para los entrehierros de 20mm y 30mm. Estos resultados evidencian que el modelo TYP-Z aporta unos resultados suficientemente satisfactorios para cualquier entrehierro (5-30mm).

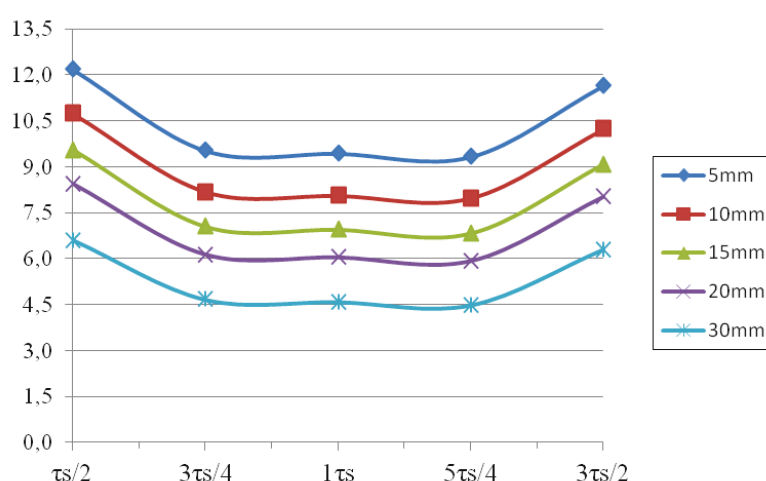


Figura 6.17: Fuerza de empuje del MSLIP-H con Imanes inclinados ( $1/2$ - $3/2 \tau_s$ ) para distintos valores del entrehierro.



Para este diseño TYP-Z, lógicamente también se cumple que el incremento del entrehierro disminuye la fuerza normal (Fuerza de atracción); también se determina que es posible hallar en primera aproximación el empuje nominal necesario en cada caso para que el motor mueva una carga de 18.000 kg a velocidad nominal, en terreno llano, según se estableció en el apartado 4.1.1 de esta tesis. Considerando un peso aproximado del deslizador de 100 kg, se analiza el resultado de la fuerza normal en cada caso (ver **Tabla 6.3**) se obtiene la fuerza de propulsión a partir de la ecuación (5.5). De esta forma se obtiene una aproximación de la fuerza de propulsión requerida teniendo en cuenta el incremento de un peso sobre el propio motor en carga que supone la existencia de la fuerza de atracción que experimenta el deslizador en cada caso. Los resultados en régimen permanente son los mostrados en la **Tabla 6.5**. En todos los casos de este diseño, también se cumple que el motor alimentado a una densidad de corriente de 3 A/mm<sup>2</sup> tendrá suficiente fuerza de propulsión para mover la carga estimada sobre terreno con pendiente del 3%; en el modelo TYP-Z, siempre existe un valor de inclinación de los imanes para cada entrehierro que hace que el empuje del motor supere el necesario. Un adecuado sistema de control será el encargado de gestionar el suministro de energía necesario para cada caso.

Tabla 6.5: MSLIP-H TYP-Z modelado con varios ángulos de inclinación y entrehierro.

Ángulo de inclinación respecto a $\tau s$	Entrehierro	Fuerza de empuje (kN)	Empuje necesario en régimen permanente Sobre llano (kN)	Empuje necesario en régimen permanente Pendiente 3% (kN)
"1/2"	5	12,17	3878,21	5459,30
	10	9,52	3724,19	5241,08
	15	9,43	3673,80	5169,70
	20	9,32	3634,22	5113,62
	30	11,64	3679,56	5177,86
"3/4"	5	10,73	3673,80	5169,70
	10	8,17	3543,53	4985,14
	15	8,04	3504,67	4930,08
	20	7,96	3470,12	4881,13
	30	10,22	3496,75	4918,86
"1"	5	9,53	3560,09	5008,59
	10	7,05	3457,17	4862,78
	15	6,95	3421,90	4812,81
	20	6,83	3388,07	4764,89
	30	9,06	3398,15	4779,16
"5/4"	5	8,43	3475,16	4888,27
	10	6,12	3395,99	4776,11
	15	6,03	3365,76	4733,28
	20	5,92	3338,41	4694,53
	30	8,01	3334,09	4688,41
"3/2"	5	6,58	3415,42	4803,64
	10	4,66	3340,57	4697,59
	15	4,59	3344,17	4702,69
	20	4,48	3365,04	4732,26
	30	6,28	3357,84	4722,06

A continuación el estudio en este capítulo 6 de la tesis se centrará en los prototipos estudiados con entrehierros entre 15mm y 30mm para aplicaciones a sistemas de transporte.

Las **Figura 6.18**, **Figura 6.19** y **Figura 6.20** muestran los resultados de las fuerzas de empuje para cada modelo simulado variando el ángulo de inclinación y con un entrehierro de 15, 20 y 30 mm respectivamente. Claramente se observa que cuanto mayor sea el entrehierro menor será la fuerza de propulsión del modelo; para mover la misma carga, será necesario ajustar el nivel de corriente aportado al estator. Sin

embargo se aprecia ligeramente que el rizado de las fuerzas también disminuye como se observa en la curvas de cada uno de los modelos inclinados a  $\tau_s$  y  $5\tau_s/4$ .

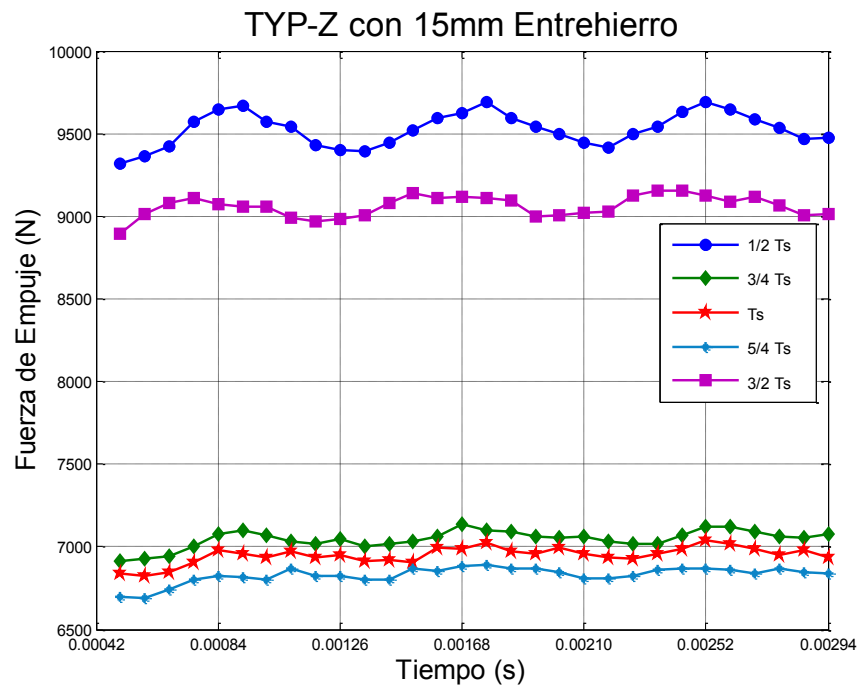


Figura 6.18: Fuerzas de Empuje modelo TYP-Z para diferentes ángulos de inclinación, 15mm de Entrehierro con densidad de corriente en  $3 \text{ A/mm}^2$ .

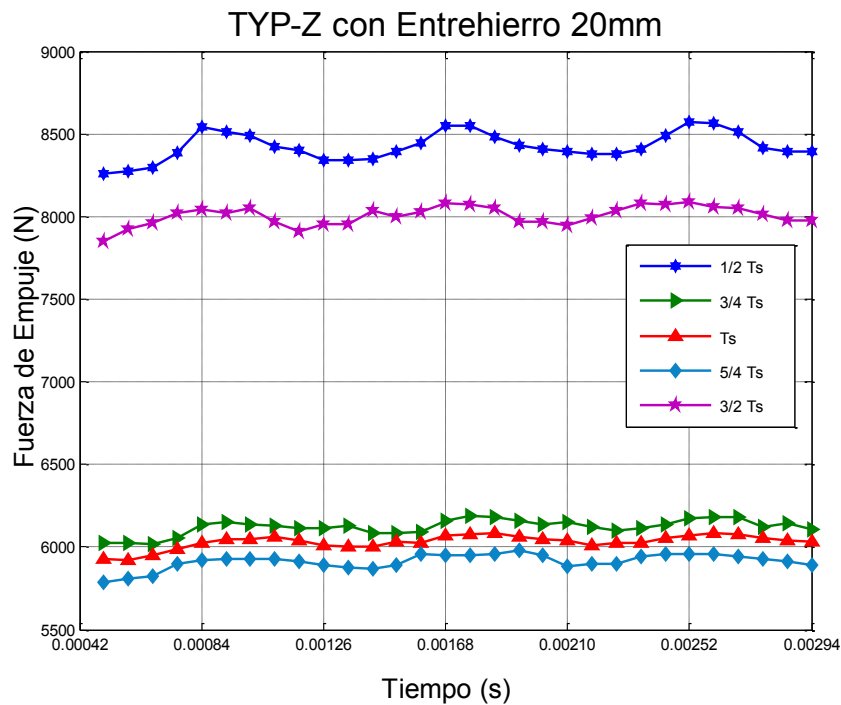


Figura 6.19: Fuerzas de Empuje modelo TYP-Z para diferentes ángulos de inclinación, 20mm de Entrehierro con densidad de corriente en  $3 \text{ A/mm}^2$ .

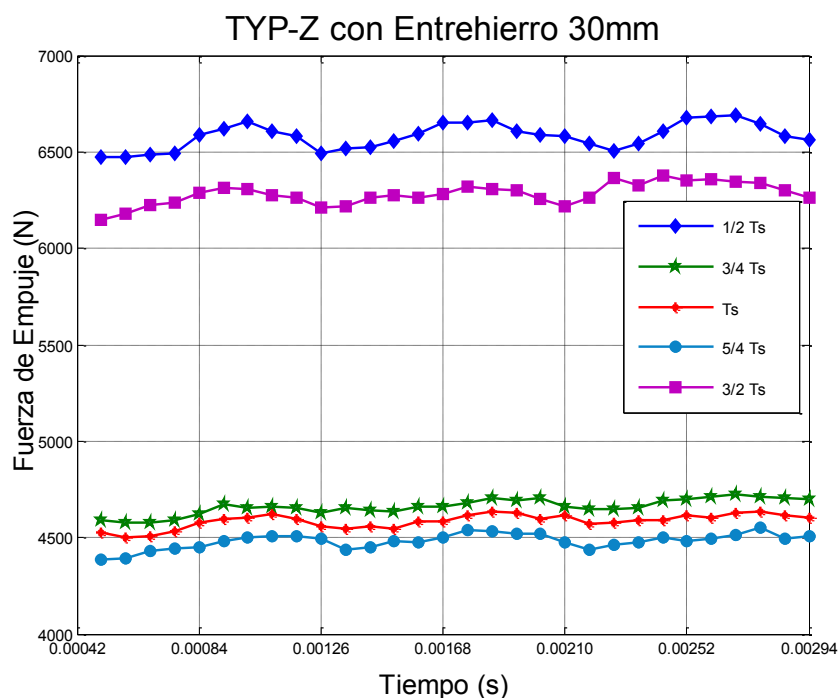


Figura 6.20: Fuerzas de Empuje modelo TYP-Z para diferentes ángulos de inclinación, 30mm de Entrehierro con densidad de corriente en  $3 \text{ A/mm}^2$ .

Se analizan ahora los resultados del modelo TYP-Z a 15 mm de entrehierro, para ver el comportamiento del motor cuando se modifica la densidad de corriente aplicada al devanado estático (**Tabla 6.6**); el modelo seleccionado es el que presenta una fuerza de empuje próxima a la mayor fuerza encontrada en cada caso.

A continuación se muestra que el campo magnético generado por el prototipo a 15mm de entrehierro y  $3 \text{ A/mm}^2$  no afecta a la saturación del núcleo del hierro; tampoco el campo producido por el devanado llega a sobrepasar los valores parametrizados del campo magnético en el núcleo del estator (**Figura 6.21** y **Figura 6.22**). Los resultados corresponden al modelo TYP-Z a 15 mm que dio mayor empuje.

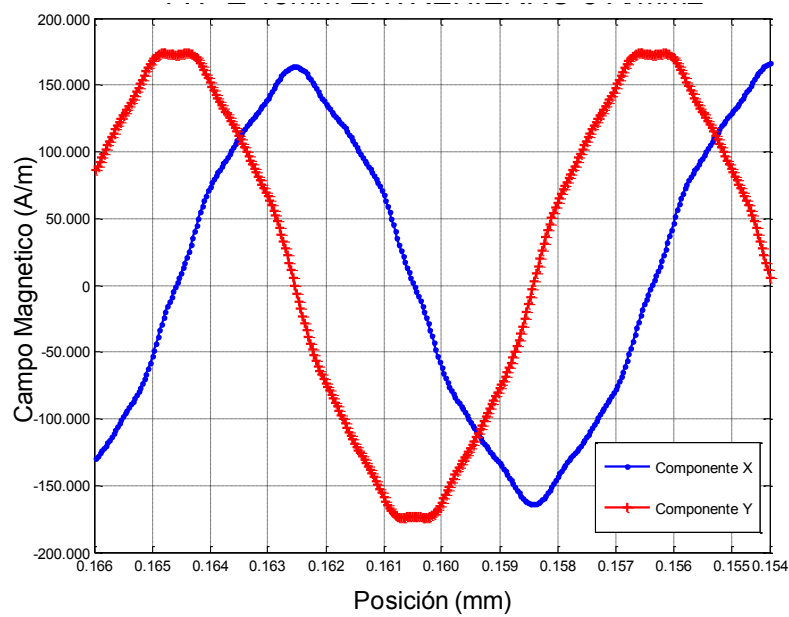


Figura 6.21: Campo Magnético modelo TYP-Z a 15mm de entrehierro, 3 A/mm<sup>2</sup>

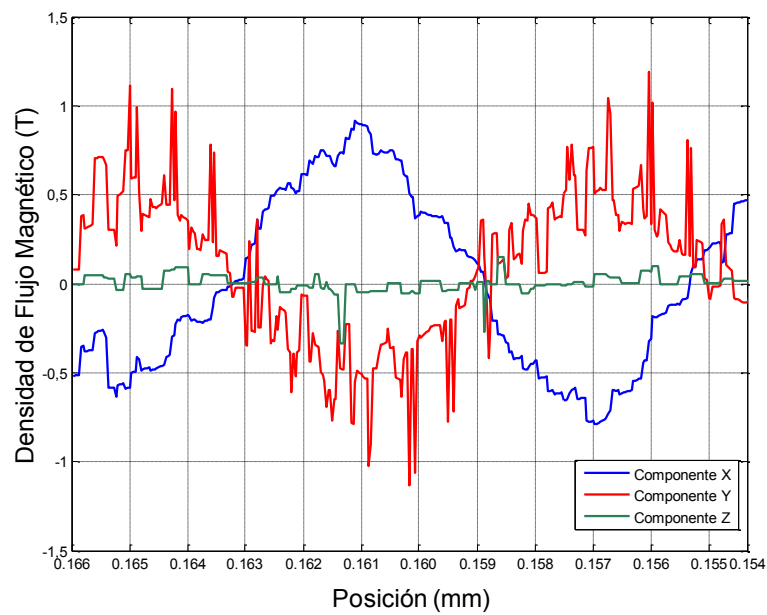


Figura 6.22: Densidad de Flujo Magnético TYP-Z 15mm de entrehierro, 3 A/mm<sup>2</sup>

Se verifica la saturación magnética del hierro analizando el comportamiento del modelo para una intensidad de corriente igual a 6 A/mm<sup>2</sup> obteniendo los siguientes resultados (**Figura 6.23**).

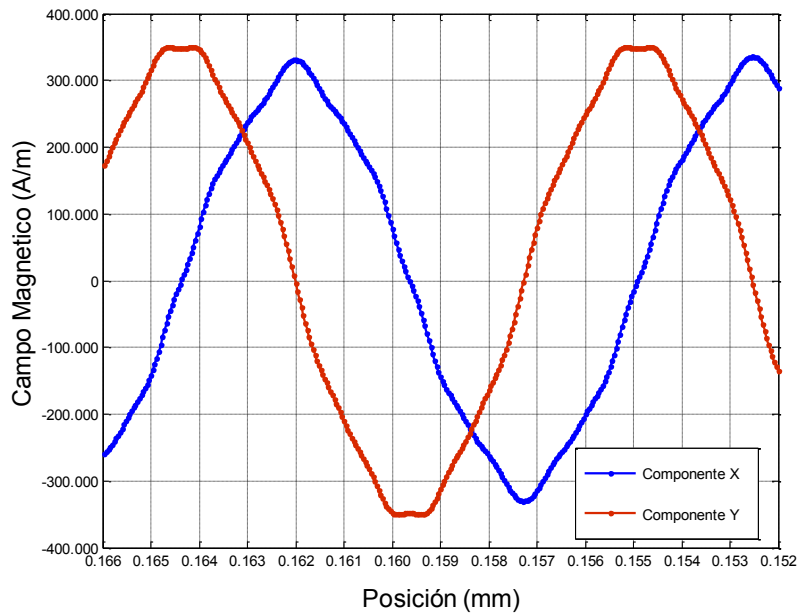


Figura 6.23: Campo Magnético del TYP-Z a 15mm entrehierro y 6 A/mm<sup>2</sup>.

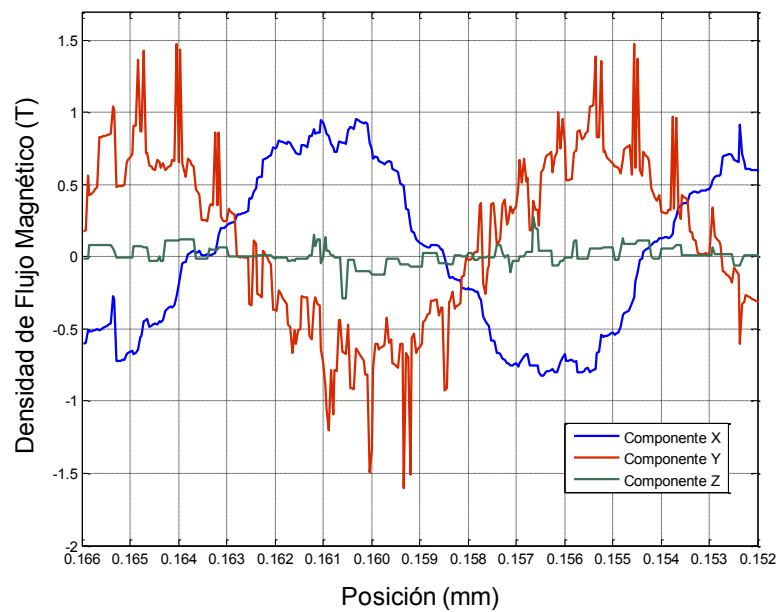


Figura 6.24: Densidad de Flujo Magnético TYPZ 15mm de Entrehierro, 6 A/mm<sup>2</sup>.

La **Figura 6.24** muestra la densidad de flujo magnético en el entrehierro del modelo comprobando que aun con el incremento de la intensidad de corriente, el motor no satura el núcleo y permite tener un margen significativo para los sistemas de control. La distribución de la densidad de flujo magnético en el prototipo a 15 mm de entrehierro y con densidad de corriente 3 A/mm<sup>2</sup> se muestra en la **Figura 6.25**. Claramente se observa que el modelo muestra un valor de 3.6 T para el punto más crítico como resultado de acoplamiento de los campos generados por los imanes y por el devanado del estator.

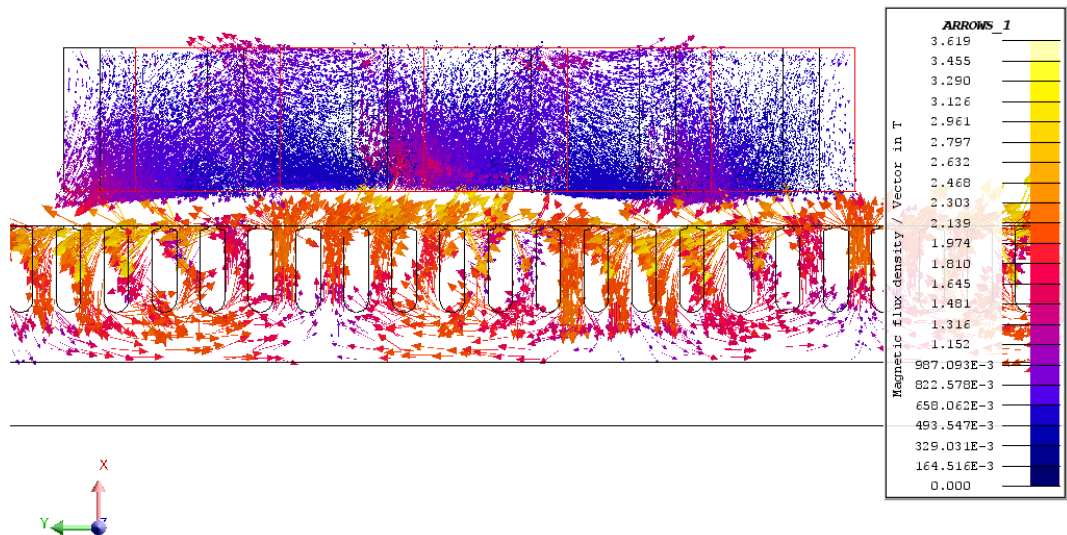


Figura 6.25: Densidad de Flujo Magnético en prototipo TYP-Z a 15 mm de entrehierro y con densidad de corriente de 3 A/mm<sup>2</sup>.

Como ejemplo ilustrativo de la forma de onda de la fuerza normal, a continuación se muestran los resultados del mejor modelo TYP-Z a 20mm, ángulo de inclinación de un paso de ranura y 3 A/mm<sup>2</sup>.

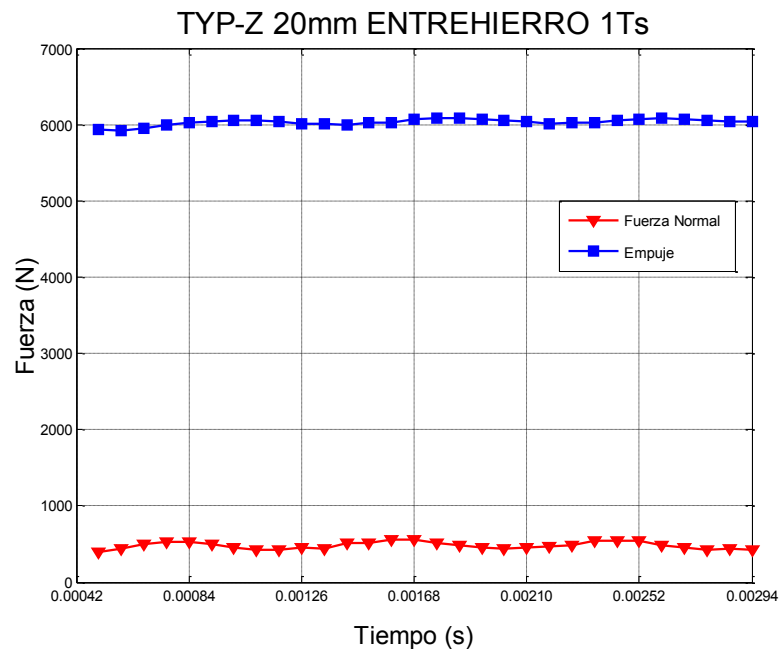


Figura 6.26: Fuerzas Empuje y Normal del prototipo TYP-Z a 20 mm de entrehierro y densidad 3 A/mm<sup>2</sup>.

En la **Tabla 6.6** se resumen los mejores resultados obtenidos en cada modelo de MSLIP diseñado en el capítulo 6, así como los del modelo de partida.

Tabla 6.6: Fuerzas de Empuje y Rizado de los prototipos modelados de las nuevas topologías.

Entre- hierro (mm)	Diseño MSLIP	$\Delta D$	Componente X Fn Deslizador (kN)	Componente Y Fe Deslizador (kN)	Rizado (kN)	% Rizado	Fe/Rizado
5	Inicial	"5/4"	12,41	10,77	0,65	6,02	16,61
	TYP-C	1	10,54	6,12	1,77	28,92	3,46
	TYP-7	"1/2"	6,96	12,29	0,80	6,51	15,36
	TYP-L	"1/2"	6,75	12,09	0,71	5,89	16,97
	TYP-Z	"5/4"	4,21	9,32	0,31	3,34	29,95
10	Inicial	"1"	8,88	9,50	0,48	5,07	19,71
	TYP-7	"1/2"	4,72	10,67	0,66	6,18	16,18
	TYP-L	"1/2"	3,54	10,54	0,55	5,20	19,25
	TYP-Z	"5/4"	1,93	7,96	0,24	3,04	32,84
15	Inicial	"3/4"	6,29	8,74	0,40	4,54	22,02
	TYP-7	"1/2"	1,98	9,47	0,41	4,37	22,90
	TYP-L	"1/2"	0,86	9,49	0,41	4,31	23,19
	TYP-Z	"5/4"	0,79	6,83	0,2	2,88	34,76
20	Inicial	"1/2"	5,21	8,29	0,33	3,95	25,33
	TYP-Z	"1"	0,48	6,03	0,17	2,76	36,18
30	Inicial	"0"	1,50	6,21	0,19	3,04	32,88
	TYP-Z	"1"	0,18	4,59	0,14	2,95	33,9

Para este estudio se observa que:

- Los modelos con mayor capacidad para alcanzar el empuje necesario en régimen permanente son todos los de menor entrehierro; sin embargo los modelos que muestran la mejor relación entre la fuerza de propulsión y su rizado, son los que tiene su espesor de entrehierro entre 15 y 30 mm.
- Si el objetivo es mantener o elevar el empuje, manteniendo el rizado y reduciendo la fuerza normal, la topología TYP-L resulta la más conveniente.
- En general, para cualquiera que sea el valor del entrehierro del motor, la topología que consigue minimizar el rizado de la fuerza de empuje del motor es la TYP-Z; ésta llega a reducirse en torno al 50 % respecto del modelo base a 15 mm planteado en el capítulo 5, mientras que la máxima caída de la fuerza de un 21 %. Para estos modelos el rizado del empuje es inferior al 3%, algo que no se consigue en ningún otro MSLIP, por lo que éstos tendrán menos vibraciones y la estructura del deslizador se verá menos afectada.



- Con la nueva topología de deslizador TYP Z, se consigue reducir la fuerza de retención en un 36% respecto de los valores obtenidos en el diseño de relación mejorada.

## Referencias

- [1] J. Coey. Permanent magnet applications. *J Magn Magn Mater* 248(3), pp. 441-456. 2002.
- [2] Magnetic Materials Producers Association. *Standard Specifications for Permanent Magnet Materials* 1996.
- [3] M. G. Abele and M. G. Abele. *Structures of Permanent Magnets: Generation of Uniform Fields* 1993.
- [4] M. G. Abele, J. Jensen and H. Rusinek. *Open Permanent Magnet Structure for Generating Highly Uniform Field* 1996.
- [5] J. Jensen and M. Abele. Maximally efficient permanent magnet structures. *J. Appl. Phys.* 79(2), pp. 1157-1163. 1996.
- [6] H. A. Leupold and P. I. Ernest. *Permanent Magnet Structures for the Production of Transverse Helical Fields* 1988.
- [7] D. P. Arnold and N. Wang. Permanent magnets for MEMS. *Microelectromechanical Systems, Journal Of* 18(6), pp. 1255-1266. 2009.
- [8] E. Spooner, A. Williamson and G. Catto. Modular design of permanent-magnet generators for wind turbines. *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 143(5), pp. 388-395. 1996.
- [9] Rotor assembly for permanent magnet generator, D. Peterson A. 3,909,647 Available: <http://www.freepatentsonline.com/3909647.pdf>, 1975.
- [10] D. P. Arnold, S. Das, J. Park, I. Zana, J. H. Lang and M. G. Allen. Microfabricated high-speed axial-flux multiwatt permanent-magnet generators&# 8212; part II: Design, fabrication, and testing. *Microelectromechanical Systems, Journal Of* 15(5), pp. 1351-1363. 2006.
- [11] S. Noodleman. *Method of Manufacturing Rare Earth Permanent Magnet Rotor* 1976.
- [12] B. H. Rabin and C. H. Sellers. *Rare Earth Permanent Magnet and Method for Making Same* 2001.

# CAPITULO 7.

## 7. CONCLUSIONES, APORTES Y PUBLICACIONES.

A continuación se presentan las conclusiones y aportaciones más importantes realizadas sobre el tema tratado en la tesis, así como las publicaciones realizadas al respecto.

### 7.1 Conclusiones.

En general, se consigue diseñar un motor eléctrico capaz de propulsar un vehículo a la velocidad adecuada sin necesidad de sistemas de acumulación de energía, con las ventajas que esto conlleva para la conservación del medio ambiente. Con cuatro MSLIPs en disposición Halbach como el diseñado, es posible podemos mover a velocidad nominal un vehículo pesado con una masa equivalente a 18 toneladas; el conjunto de motores ha de ofrecer una fuerza de propulsión mínima de 13 kN. Para los transitorios, como el arranque o durante el funcionamiento sobre terreno no horizontal, el sistema de control incrementará la convenientemente la corriente aplicada al estator.

Respecto a las conclusiones obtenidas del análisis de vibraciones de dos modelos de MSLIPs de polos opuestos son:

- Para el modelo MSLIP con ranura abierta el ángulo de inclinación que ofrece el mayor empuje corresponde a  $\Delta D = 3/2 \tau_s$ ; sin embargo, fuerza de diente en este modelo es elevada, por lo que tiene altos niveles de energía vibracional, por lo que puede sufrir daños estructurales a corto plazo.

- Para el MSLIP con ranura cerrada el ángulo de inclinación que ofrece mejor empuje así como la mejor relación entre la vibración y empuje corresponde a  $\Delta D =$

$3/2 \tau_s$ ; tiene menor fuerza de diente y niveles de vibración en comparación con el modelo MSLIP con ranura abierta.

- En general la densidad de flujo y la fuerza de empuje del MSLIP con estator de ranura semicerrada tienen menor distorsión armónica que con ranura abierta. En esta tesis se empleó estator con ranura semicerrada dado los resultados obtenidos en los modelos simulados.

Respecto a las mejoras propuestas en el diseño del MSLIP-H respecto al obtenido a partir del MS rotativo:

- En la literatura existente se encuentran técnicas y métodos de optimización aplicados a las topologías de los MSLIP en general, son pocas o casi inexistentes las aplicaciones de las técnicas de mejoras mediante el proceso de inclinación de los imanes en configuración Halbach.

- Se obtiene un mejor resultado cuando se aplica una adecuada relación entre la longitud del imán y el paso de ranura, relación que consigue reducir la fuerza de retención en los MSLIP-H; sin embargo para el primer caso estudiado con el prototipo TYPN5AG se obtiene una reducción de la fuerza de retención, pero no se logran buenos resultados de la fuerza de atracción, ya que esta fuerza sigue siendo muy superior a la fuerza de empuje (casi 4 veces) provocando dificultad en el arranque, y mayor esfuerzo en el funcionamiento del motor.

- Para comprobar el efecto de la inclinación de los imanes MSLIP-H sobre las fuerzas que intervienen en el movimiento del motor, se han realizado 30 simulaciones en régimen dinámico del MSLIP-H propuesto; se han obtenido valores de la fuerza de empuje, rizado y de la fuerza normal. Se han simulado diversos espesores de entrehierro (5-30 mm) y distintos ángulos de inclinación de los imanes del deslizador (correspondientes a desplazamientos de entre 0 y  $3/2$  del paso de ranura). Cada prototipo está alimentando con la misma potencia de entrada y se simula a la misma velocidad lineal del deslizador. Los valores de fuerza obtenidos para cada valor de entrehierro analizado evidencian una notable variación de la fuerza de empuje: existe un

valor de la inclinación que ofrece la mejor relación Empuje vs Rizado y que es diferente para cada entrehierro.

- Se obtiene que la fuerza de retención se reduce con la adecuada inclinación de los imanes en los MSLIP-H con estator ferromagnético y ranura semicerrada para espesores de entrehierro de hasta 30 mm.

- Se comprueba que con el incremento del espesor de entrehierro, la inclinación óptima de los imanes de los MSLIP-H decrece.

- En todos los casos el motor alimentado a  $3 \text{ A/mm}^2$  tiene una fuerza de propulsión suficiente para mover la carga estimada, teniendo en cuenta la fuerza normal: siempre existe un valor de inclinación de los imanes para cada entrehierro que hace que el empuje del motor supere el necesario. Sin embargo, puede que en aplicaciones sobre terrenos con pendiente muy elevada haya que aplicar una densidad de corriente superior a los  $3 \text{ A/mm}^2$  y evaluar las pérdidas del sistema con el fin de diseñar un sistema de refrigeración adecuado a cada aplicación.

- Los modelos con mayor capacidad para alcanzar el empuje necesario en régimen permanente lógicamente son todos los de menor entrehierro; los modelos que muestran la mejor relación entre la fuerza de propulsión y su rizado, son los que tiene su espesor de entrehierro entre 15 y 30 mm.

Respecto a las nuevas topologías propuestas en el diseño del deslizador del MSLIP-H para reducir el rizado y la fuerza normal:

- Si el objetivo es mantener o elevar el empuje, manteniendo el rizado y reduciendo la fuerza normal, la topología TYP-L resulta la más conveniente.

- En general, para cualquiera que sea el valor del entrehierro del motor, la topología que consigue minimizar el rizado de la fuerza de empuje del motor es la TYP-Z, que llega a reducirse en torno al 50 % respecto del modelo base a 15 mm planteado en el capítulo 5, mientras que la máxima caída de la fuerza de un 21 %. Para estos modelos el rizado del empuje es inferior al 3%, algo que no se consigue en ningún otro

MSLIP, por lo que éstos tendrán menos vibraciones y la estructura del deslizador se verá menos afectada.

- Con la nueva topología de deslizador TYP Z, se consigue reducir la fuerza de retención en un 36% respecto de los valores obtenidos en el diseño de relación mejorada.

## **7.2 Aportaciones.**

- Estudio motores síncronos lineales de imanes permanentes en disposición Halbach para ser utilizados como sistema de propulsión de vehículos pesados utilizados en sistemas de transporte.
- Utilización de la transformada rápida de Fourier para comprobar y clasificar los niveles de vibración que presentan los MSLIP-H en la estructura que soporta los imanes permanentes; en la literatura actual no se encontró evidencias de esta técnica aplicada al análisis de vibración de estos motores síncronos lineales.
- Un aporte destacado es la utilización de la relación de ancho de imán y paso de ranura utilizado para el diseño del MSLIP en configuración Halbach con imanes inclinados aplicado a un sistema de transporte.
- Se obtiene que la fuerza de retención se reduce con la adecuada inclinación de los imanes en los MSLIP-H con estator ferromagnético y ranura semicerrada para espesores de entrehierro de hasta 30 mm.
- El aporte más importante en esta tesis es la propuesta de nuevas topologías del deslizador de imanes permanentes (Topologías TYP-7, TYP-L y TYP-Z) para el MSLIP-H; conservando el volumen de cada imán y la configuración Halbach, se logran diseños con mejores resultados de la relación Empuje vs Rizado y una reducida fuerza de atracción, que con las topologías de deslizador convencional.

### **7.3 Futuras líneas de Investigación del MSLIP-H.**

Posibles temas a desarrollar en el futuro para continuar con la línea de investigación planteada en esta tesis, son:

- Una futura línea de investigación es el estudio en tiempo real y de los prototipos propuestos en esta tesis para verificación experimental de las fuerzas de propulsión generadas en el MSLIP-H.
- El estudio y análisis transitorio del MSLIP-H utilizando diferentes frecuencias desde un rango de 50 Hz hasta valores mayores de 500 Hz.
- Estudiar la viabilidad de mejorar esta propuesta con nuevos diseños geométricos y de sistemas de deslizamiento y /o traslación del dispositivo móvil del MSLIP-H.
- La investigación de costes de fabricación y construcción de los prototipos adecuados a los sistemas de transporte.
- Generación de modelos del MSLIP-H para las distintas topologías de deslizador que permitan una fácil simulación en programas como Matlab/Simulink.
- Otra línea de investigación propuesta es el estudio de diferentes modelos de devanado para mejorar el rendimiento y potencia de estos motores propuestos en esta tesis.

### **7.4 Publicaciones.**

Las publicaciones realizadas durante el tiempo que se realiza esta investigación fueron los siguientes:

***Publicación en Revista Internacional:***

*“NEW METHOD OF VIBRATION ANALYSIS OF SIGNAL FORCE OF SKEW PERMANENT MAGNET IN PERMANENT MAGNET LINEAR SYNCHRONOUS MOTORS”.*

By Javier Rivas-Conde, Gabriel González-Palomino, Edwin Laniado-Jácome, Jaime Montoya-Larrahondo. Vol.5. n. 5, pp. 1994-1999. Copyright © 2010 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

*“ADAPTIVE METHOD OF COMPARISON TO IDENTIFY FOR FORCE RIPPLES IN WAVELET COEFFICIENTS OF TWO TYPES LINEAR MOTORS WITH PERMANENT MAGNETS”.* By Edwin Laniado-Jacome<sup>1</sup>, Jaime Montoya-Larrahondo, Gabriel González-Palomino<sup>1</sup>, Yimy E. Garcia-Vera. 03/2014 - Volume 4 Manuscript no -2014/BJAST/9233.

British Journal of Applied Science & Technology.

<http://www.sciencedomain.org/issue.php?iid=492&id=5>.

*“DISEÑO DE MOTORES SÍNCRONOS LINEALES DE IMANES PERMANENTES EN DISPOSICIÓN HALBACH”* Autor/es: Jaime Montoya, Juan Daniel Marín y Mónica Chinchilla. ISBN: ISSN, 2172-1246, N° Edición: 1, Año Publicación: 2013 País Edición: España Localidad Edición: Vigo Editorial: Asociación Española para el Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (AEDIE). *Electrical Engineering Electronic Journal (EEEJ)*.

### ***Contribución en Congresos:***

*“VIBRATION ANALYSIS PRODUCED BY THE VARIATION OF THE MAGNETIC FORCE PRESENT IN THE MODELS OF LINEAR MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS OF OPPOSITE POLES AND HALBACH TYPE”*

By: J. Montoya-Larrahondo, E. Laniado-Jácome.

ACTA TECHNICA CORVINIENSIS– BULLETIN of ENGINEERING

ISSN: 2067-3809 [CD-Rom, online] copyright © University Politehnica Timisoara, Faculty of Engineering Hunedoara, 5, Revolutiei, 331128, Hunedoara, ROMANIA

<http://acta.fih.upt.ro>



*“DISEÑO DE MOTORES SÍNCRONOS LINEALES DE IMANES PERMANENTES EN DISPOSICIÓN HALBACH”*

Jaime Montoya, Juan Daniel Marín y Mónica Chinchilla.

13th SPANISH-PORTUGUESE CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING (XIIIICHLIE). <http://www.aedie.org/papers-2.html>

*“DESIGN OF A PERMANENT MAGNET LINEAR SYNCHRONOUS MOTOR WITH HALBACH ARRAY FOR AN URBAN TRANSPORT VEHICLE”*

Jaime Montoya Larrahondo, Juan D. Marín Carrasco and Mónica Chinchilla Sánchez

13th Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación 2013 (SAAEI'13), Madrid – España. <http://www.saaei.org/edicion13/>

***Libros Publicados:***

*“PROTOTIPO DESLIZADOR DE UN MOTOR LINEAL SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES: DISEÑO, CALCULO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LOS ESFUERZOS SOMETIDOS EN EL DESLIZADOR”.*

Autores: Daniel González García, Jaime Montoya-Larrahondo, Edwin Laniado-Jácome.  
ISBN 978-3-8473-5618-9.

EDITORIAL: LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING GMBH & CO. KG.

*“TECNOLOGÍA DEL MOTOR LINEAL SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES. ESTUDIO, MODELADO Y ANÁLISIS APLICADO PARA DIFERENTES POTENCIAS”.*

Autores: Javier Feito Pérez, Alejandro García Galiano, Jaime Montoya.

ISBN: 978-3-659-07066-2

EDITORIAL: LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING GMBH & CO. KG.

*“MOTOR LINEAL SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES; ESTUDIO DE SU COMPORTAMIENTO Y COMPARACIÓN CON SU ANÁLOGO ROTATIVO”.*

Autores: Alejandro García Galiano, Javier Feito Pérez, Jaime Montoya.

ISBN: 978-3659069062

EDITORIAL: LAP LAMBERT ACADEMIC PUBLISHING GMBH & CO. KG.

***Publicaciones enviadas, pendientes de respuesta:***

*"Effect of Skewed Magnets on Thrust Ripple and Cogging Force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Halbach Array"*, Jaime Montoya y Monica Chinchilla, enviado el 10/04/2014 al Transactions on Industrial Electronics.

*"New Topology of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor in Halbach Array"*, Jaime Montoya y Monica Chinchilla, enviado el 14/06/2014 al IEEE Transactions on Magnetics.

*"New Design of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor for an Urban Rail Transit Application"*, Jaime Montoya y Monica Chinchilla, enviado el 21/07/2014 al IEEE Transactions on Vehicular Technology.

## **ANEXO: MODELADO DE LAS ESTRUCTURAS PARA UN MOTOR LINEAL.**

### **A.1 Diseño de la Estructura Soporte del Deslizador.**

A continuación se propone procedimiento del diseño de la estructura soporte del deslizador del MSLIP.

El objetivo principal es modelar una estructura tipo soporte para proteger el motor y que sirva para su funcionalidad. El MSLIP se compone de dos conjuntos: el deslizador que servirá de sistema de acople a la estructura del autobús y el estator que estará fijo sobre el suelo y será el camino que se le asignará al vehículo.

El modelado estructural del deslizador se realiza para proteger los imanes permanentes de impactos, vibraciones, entre otros y mantener en un rango mínimo la distancia sobre el suelo, además de disponer de un mecanismo funcional de movimiento. Para ello se siguen los siguientes cuatro pasos:

- El primer paso es el modelado del deslizador (Translator) pieza a pieza, creando los elementos mecánicos necesarios para proteger los imanes y fijarlos a la estructura del autobús; el deslizador se fija a una estructura rígida y sin amortiguación para mantener la distancia de los imanes al estator.
- El segundo paso es el análisis de las frecuencias naturales del deslizador para conocer los modos de vibración y sus frecuencias de resonancia.
- El tercer paso consiste en aplicar la fuerza dinámica de funcionamiento para conocer las tensiones, la deformación y los desplazamientos de las piezas motivadas por esta señal de fuerza.
- En el cuarto paso se optimiza el modelo mecánico para conocer el mínimo empuje que genere movimiento al sistema.

### A.1.1 Modelado de la estructura del deslizador.

El modelo se realizaría con un software CAD (diseño asistido por ordenador) especializado en diseño mecánico, con el se realizará cada parte mecánica por separado; (*Software CAD Algor®*). Se diseñan las piezas para que se ajusten al modelo y pueda soportar las cargas y las fuerzas de atracción y de empuje del sistema. Luego se ensamblan con el montaje de todas las partes del deslizador. El sistema CAD de Algor® tiene elementos mecánicos normalizados como rodamientos, engranajes, bisagras, entre otros.

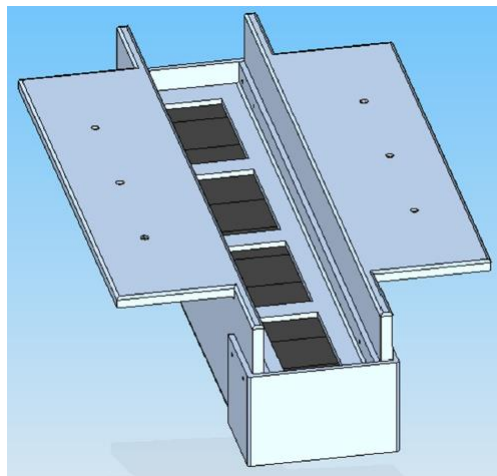


Figura A.1: Modelado de varias piezas (cuna, imanes, jaula).

En la **Figura A.1** se muestra el sub ensamblaje de la parte generadora de la reacción del deslizador como parte del motor lineal.

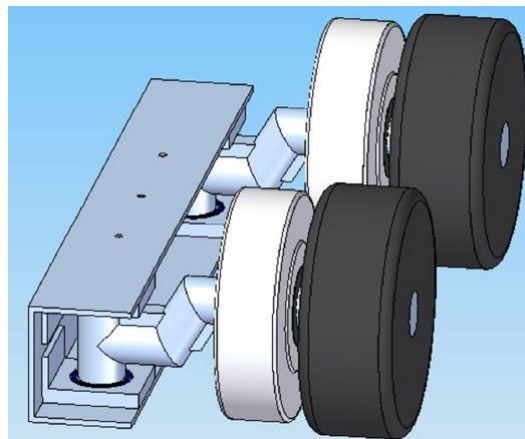


Figura A.2: Ensamblaje división de apoyo del deslizador.

La **Figura A.2** muestra una de las dos partes del dispositivo en que se apoya el deslizador, es un ensamblaje de piezas mecánicas comerciales, estándares y originalmente modificada para el movimiento del sistema bajo carga.

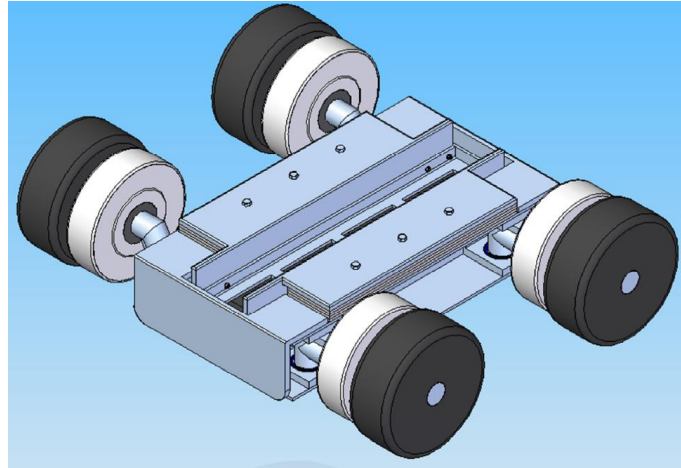


Figura A.3: Modelo del deslizador completo no optimizado.

En la **Figura A.3** se muestra el modelo del deslizador no optimizado con el diseño mecánico total de la estructura. Las piezas ensambladas guardan la distancia y protegen a los imanes de futuros golpes y el daño por vibración, pero falta el análisis estructura del deslizador para conocer si el ensamble sostiene el sistema bajo carga.

Para el cálculo dinámico de la estructura se necesita optimizar el modelo para disminuir la matriz de rigidez del sistema sin cambiar patrones de comportamiento y tener resultados con mejor aproximación.

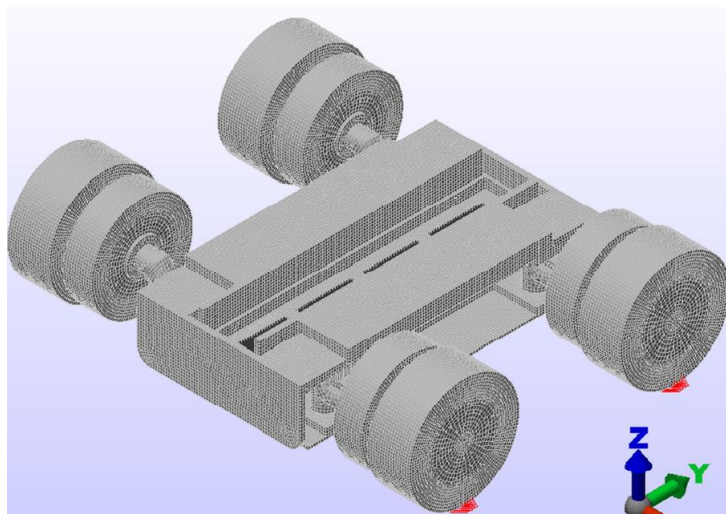


Figura A.4: Malla del modelo optimizado para el cálculo en MEF.

La **Figura A.4** define el mallado del modelo con la mayor optimización posible para el cálculo por medio de los elementos finitos.

### A.1.2 Análisis de modos de vibración.

Este análisis genera resultados de los modos de vibración por cada coordenada con sus frecuencias de resonancia; se podrán la o las frecuencias que podrían dañar el ensamblaje del deslizador o desajustarlo para el caso de que alguna frecuencia de funcionamiento fuera similar en magnitud y dirección a alguna de las frecuencias de resonancia.

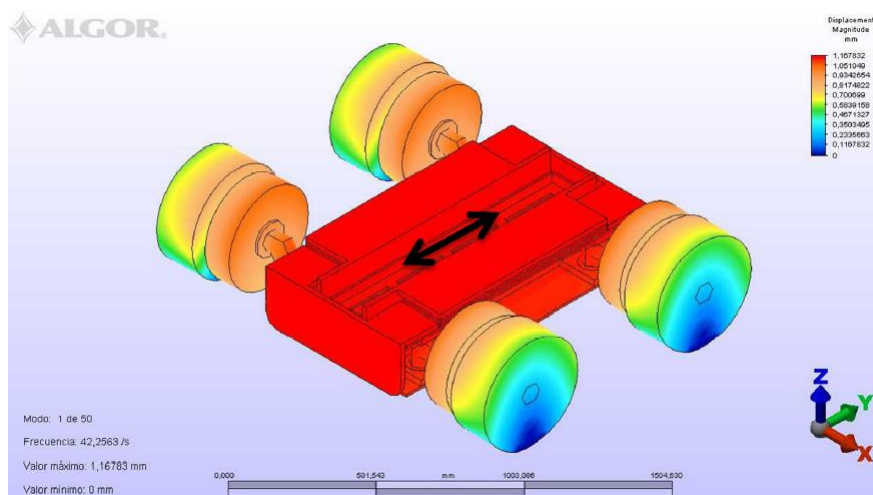


Figura A.5: Primer modo de vibración con movimiento en Y.

En el análisis mostrado en la **Figura A.5** se muestra los primeros 50 modos analizados; como conclusiones del análisis destacar que se han de evitar los modos de funcionamiento en eje y a las frecuencias más bajas. Los resultados generados darán la frecuencia y la proporción de masa que se desplaza sobre esa coordenada; es por esto que aunque se tenga una frecuencia de funcionamiento igual o similar a una frecuencia natural del sistema, si no coinciden las direcciones de dichas frecuencias, no efectuara ningún daño o perturbación al deslizador.

### A.1.3 Análisis de tensión a la estructura bajo carga dinámica.

Se analiza la dinámica de la estructura en carga. Lo relevante de los resultados de tensiones es determinar las uniones y las zonas con mayor vulnerabilidad a la rotura por la carga de funcionamiento del sistema (ver **Figura A.6**). El programa realiza un cálculo de los límites de tensión para no llegar a la zona plástica; en sistemas como este se recomienda lo más alejado posible de este límite debido a la rigidez del sistema. La fuerza dinámica debe aplicarse sobre las superficies de los imanes.

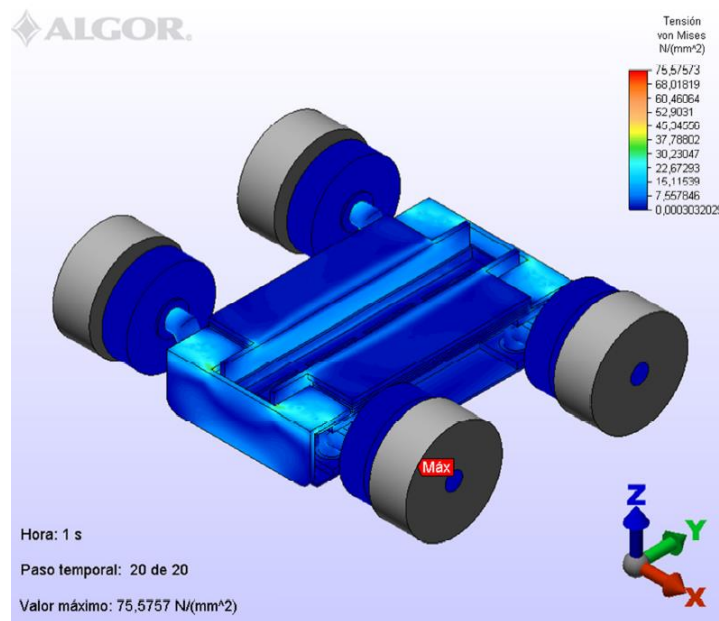


Figura A.6: Resultados de tensiones bajo carga dinámica.

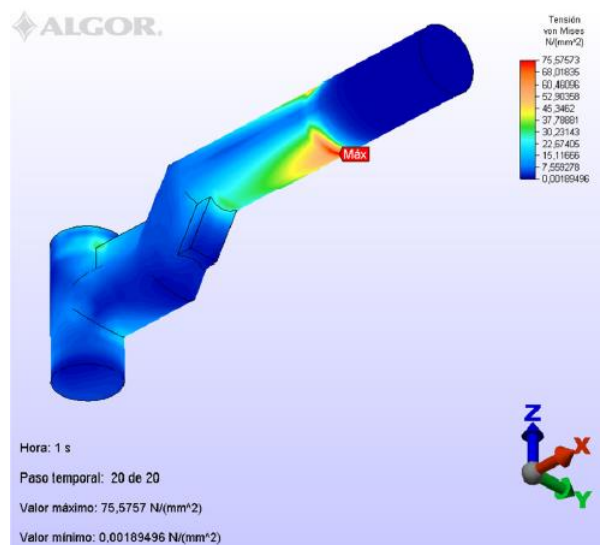


Figura A.7: Muestra de una parte de la simulación.

#### A.1.4 Análisis de empuje.

El modelo dinámico simulado guarda de forma aproximada todas las condiciones mecánicas del modelo original, como se puede ver en la **Figura A.8** La fuerza de empuje calculada deberá ser la necesaria para vencer la normal generada por el contacto de las ruedas debido a la carga dinámica del sistema.

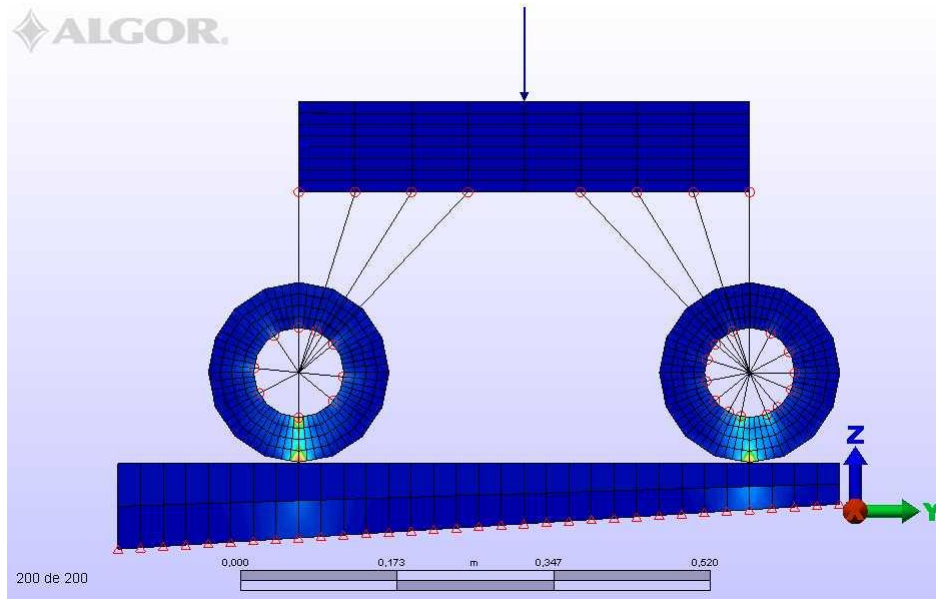


Figura A.8: Modelo de deslizador optimizado para calcular la fuerza de empuje.

Este es el procedimiento de diseño estructural que se propone; las dimensiones y cálculos se han de particularizar para el deslizador del MSLIP que se diseñe finalmente; en el próximo apartado se describe la instalación adecuada del diseño del MSLIP-H.

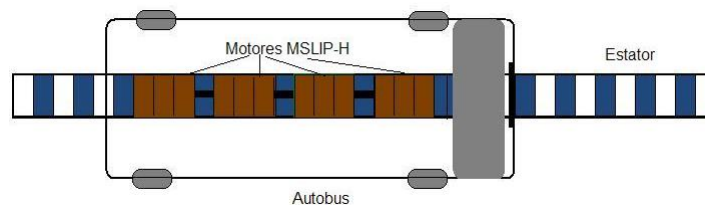


Figura A.9: Ubicación de los cuatro MSLIPs en la carcasa del autobús.

El diseño de los imanes y de su correcta instalación en el vehículo llevará a la selección de cuatro PMLSM-H de 45 kW en lugar de diseñar un motor mayor 180 kW. Cuatro motores están situados en la carcasa inferior del autobús como se muestra en la **Figura A.9**.